

**Universidad Pública de Navarra**

***Nafarroako Unibertsitate Publikoa***

**ESCUELA TECNICA SUPERIOR  
DE INGENIEROS AGRONOMOS**

***NEKAZARITZAKO INGENIARIEN  
GOI MAILAKO ESKOLA TEKNIKOA***

# SEGUIMIENTO DE CULTIVOS DE MAIZ MEDIANTE TECNOLOGIA UAV

presentado por

Daniel Pablos Andrés *(e)k*

*aurkeztua*

MÁSTER EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y TELEDETECCIÓN  
*MASTERRA INFORMAZIO SISTEMA GEOGRAFIKOETAN ETA TELEDETEKZIOAN*

Septiembre, 2016 / 2016, *Iraila*

## INDICE GENERAL

<b>1- Resumen .....</b>	<b>5</b>
<b>2- Introducción .....</b>	<b>7</b>
2.1.- Estado del arte .....	9
2.1.1- Comportamiento espectral de la vegetación .....	9
2.1.2- Índices de Vegetación.....	10
2.1.3- Causas de estrés en la vegetación .....	10
2.1.4- Trabajos relacionados.....	13
2.2- Objetivos .....	14
<b>3- Materiales y metodos .....</b>	<b>15</b>
3.1- Zona de estudio.....	15
3.2- Materiales .....	16
3.2.1- UAV.....	16
3.2.2 - Cámara.....	18
3.3- Métodos.....	19
3.3.1- Planificación de los vuelos.....	19
3.3.1.1- Planificación de los vuelos mediante Mission Planner .....	20
3.3.2- Realización de los vuelos .....	22
3.3.3- Pre-Procesado de imágenes .....	22
3.3.4- Procesado de imágenes.....	23
3.3.4.1- Procesado de imágenes RGB .....	26
3.3.4.2- Procesado de imágenes multiespectrales.....	26
<b>4- Resultados y discusión .....</b>	<b>32</b>
4.1- Análisis de Índices de Vegetación.....	32
4.2- Comparación entre tratamientos de riego.....	37
4.3- Mapas de vigor por cuadrícula .....	44
4.4- Selección del Índice de Vegetación óptimo.....	47
4.5- Zonificación según el vigor .....	48
<b>5- Conclusiones.....</b>	<b>51</b>
<b>6- Bibliografía.....</b>	<b>53</b>





## - Listado de figuras

Figura 1: Comportamiento espectral de diferentes cubiertas (Fuente: Hernandez et al.).....	9
Figura 2: Localización de la parcela de estudio .....	15
Figura 3: División de la parcela de estudio en tratamientos de riego .....	15
Figura 4: UAVs utilizados en el trabajo. A la izquierda el modelo Aeris One (Fuente: Technidrone, 2016) y a la derecha el modelo Phantom 4 (Fuente: Dji, 2016) .....	16
Figura 5: Cámara multispectral Parrot Sequoia y el sensor solar de ésta (Fuente: Parrot, 2016).....	18
Figura 6: Influencia del relieve en el GSD (izquierda) y en los solapes entre diferentes imágenes (derecha) (Fuente: Perez, 2001) .....	20
Figura 7: Interface de Mission Planner con el polígono que delimita la zona.....	21
Figura 8: Interface de Mission Planner con los parámetros necesarios para la planificación del vuelo.....	21
Figura 9: Representación grafica de la planificación e información sobre el vuelo.....	22
Figura 10: Ortofotografía y MDS de la parcela de estudio .....	26
Figura 11: Modificación del polígono original de la parcela en los bordes superpuesto sobre el NDVI del primer vuelo .....	28
Figura 12: A la derecha la vista general del buffer creado en las líneas que unen los aspersores y a la izquierda la imagen de detalle de los buffers creados superpuesta sobre la imagen del NDVI del primer vuelo .....	29
Figura 13: División de la zona de cultivo con una cuadrícula de 15x15m .....	30
Figura 14: Centroides de los polígonos creados a partir de la cuadrícula de 15x15m.....	31
Figura 15: Correlación entre el NDVI y el resto de índices .....	33
Figura 16: Correlación entre el GNDVI y el resto de índices .....	33
Figura 17: Correlación entre el RedEdgeNDVI y el resto de índices.....	33
Figura 18: Correlación entre el NGRDI y el resto de índices .....	34
Figura 19: Valores medios de los índices de vegetación por fecha .....	34
Figura 20: Histogramas de los índices de vegetación en el vuelo 1 .....	35
Figura 21: Histogramas de los índices de vegetación en el vuelo 2 .....	36
Figura 22: Histogramas de los índices de vegetación en el vuelo 3 .....	36
Figura 23: Histogramas del vuelo 1 por zonas.....	39
Figura 24: Histogramas del vuelo 2 por zonas.....	40

Figura 25: Histogramas del vuelo 3 por zonas.....	41
Figura 26: Gráfico del consumo de agua en la zona UPNA .....	43
Figura 27: Gráfico del consumo de agua en la zona INTIA .....	43
Figura 28: Mapa de vigor por cuadrícula del vuelo 1 .....	45
Figura 29: Mapa de vigor por cuadrícula del vuelo 2 .....	46
Figura 30: Fotografía RGB de la parcela de estudio .....	46
Figura 31: Mapa de vigor por cuadrícula del vuelo 3 .....	47
Figura 32: Mapa de vigor con los datos de cada píxel (izquierda) y mapa de vigor tras realizar la interpolación TIN (derecha) del vuelo 1 .....	48
Figura 33: Mapa de vigor con los datos de cada píxel (izquierda) y mapa de vigor tras realizar la interpolación TIN (derecha) del vuelo 2 .....	48
Figura 34: Mapa de vigor con los datos de cada píxel (izquierda) y mapa de vigor tras realizar la interpolación TIN (derecha) del vuelo 3 .....	49
Figura 35: Gráfico y tabla de los valores de reflectividad obtenidos en las zonas de vigor bajo y vigor alto en el vuelo 1 .....	49
Figura 36: Gráfico y tabla de los valores de reflectividad obtenidos en las zonas de vigor bajo y vigor alto en el vuelo 2 .....	50
Figura 37: Gráfico y tabla de los valores de reflectividad obtenidos en las zonas de vigor bajo y vigor alto en el vuelo 3 .....	50

#### - Listado de tablas

Tabla 1: Datos sobre los vuelos realizados para este trabajo .....	22
Tabla 2: Opciones de Pix4Dmapper en el proceso inicial.....	23
Tabla 3: Opciones de Pix4Dmapper en la creación del ortomosaico y MDS.....	25
Tabla 4: Matriz de correlaciones entre índices de vegetación.....	32
Tabla 5: Estadísticas del vuelo 1 por zonas .....	37
Tabla 6: Estadísticas del vuelo 2 por zonas .....	38
Tabla 7: Estadísticas del vuelo 3 por zonas .....	38
Tabla 8: Consumo total de agua en la zona UPNA .....	42
Tabla 9: Consumo total de agua en la zona INTIA.....	43
Tabla 10: Consumo de agua por hectárea en la zona UPNA .....	44
Tabla 11: Consumo de agua por hectárea en la zona INTIA.....	44

## 1- Resumen

El objetivo general de este trabajo ha sido realizar el seguimiento de un cultivo de maíz a partir de imágenes adquiridas desde un UAV para monitorizar su estado durante las diferentes fases de su desarrollo. Para ello se han evaluado distintos índices de vegetación obtenidos a partir de imágenes RGB y multiespectrales. Como objetivo específico se ha planteado analizar si es posible diferenciar mediante índices de vegetación dos zonas con distintos tratamientos de riego, (1) convencional y (2) basado en medidas de campo de humedad del suelo. Los resultados muestran que los distintos índices evaluados ofrecen una clara sensibilidad al desarrollo del maíz y aportan información similar. Además se ha constatado un desarrollo del cultivo similar en los dos tratamientos de riego estudiados, lo que demuestra una gestión más eficiente del agua en la zona 2 donde los aportes han sido mucho más reducidos.

- **Palabras clave:** UAV, RPAS, agricultura de precisión, maíz, índices de vegetación

## 1- Abstract

The overall objective of this work has been to monitor a corn crop using images acquired from a UAV during its different stages of development. For doing so, different vegetation indices, obtained from RGB and multispectral images, have been evaluated. As a specific objective, the viability of the identification of two zones with different irrigation treatments has been investigated, (1) conventional and (2) based on field measurements of soil moisture. The results show that the different indices evaluated have a clear sensitivity to maize development, and also that they provide similar information. Besides, there has been a similar crop development in both irrigation treatments studied, demonstrating a more efficient water management in zone 2, where irrigation amounts have been much lower.

- **Keywords:** UAV, RPAS, precision agriculture, maize, vegetation index



## 2- Introducción

Este trabajo se ha desarrollado como trabajo de fin de máster (TFM) del Máster Universitario en Sistemas de Información Geográfica y Teledetección de la UPNA (Universidad Pública de Navarra) entre mayo y agosto de 2016. El trabajo se ha llevado a cabo en la empresa Technidrone, situada en la localidad de Noain (Navarra), dedicada a la fabricación de UAVs (vehículos aéreos no tripulados) y al procesado de las imágenes obtenidas a partir de éstos.

En los últimos tiempos, este tipo de vehículos no tripulados y remotamente pilotados conocidos coloquialmente como drones, también llamados UAV (Unmanned Aircraft Vehicle) o RPAS (Remotely Piloted Aircraft Systems) están en constante actualidad, bien sean en forma de aviones de ala fija o de multicopteros. En cuanto a la legislación se refiere, los drones están considerados como aeronaves, y por tanto están sujetos a la legislación aeronáutica general vigente en España y en Europa, lo que no hace posible su vuelo en cualquier condición. Desde el 4 de julio de 2014 España dispone de una normativa provisional que legisla la operación comercial de vehículos aéreos no tripulados (UAV). Posteriormente dicha normativa fue tramitada como ley, proceso que culminó el 17 de octubre de 2014 con la publicación en el BOE de la Ley 18/2014, la cual tiene como objetivo aprobar medidas urgentes para el crecimiento, la competitividad y la eficiencia (AESA, 2016).

Como muchas otras tecnologías, el desarrollo inicial de los UAV tuvo lugar fundamentalmente en el ámbito militar (Gago et al., 2015; Cuerno et al., 2015), aunque actualmente las aplicaciones de estos equipos se han expandido a sectores como la ingeniería civil (López, 2015; Nex et al., 2014): inspecciones de infraestructuras y levantamientos topográficos; entretenimiento: filmación de películas y fotografía deportiva; agricultura: seguimiento de cultivos y agricultura de precisión; e innumerables otros como el control de caza, localización de bancos de pesca, gestión de riesgos y desastres naturales, mantenimiento de parques eólicos e infraestructuras energéticas, etc. por mencionar algunos.

En el año 2013 se llevó a cabo un estudio sobre el impacto económico de los UAVs en la economía de EEUU (AUVSI, 2013), y según este estudio los mercados civiles más prometedores para el uso de UAVs son los de agricultura de precisión y seguridad pública. Entre los dos, representan el 90% de los mercados potenciales conocidos para los UAVs (Montesinos, 2015a).

En cuanto a la agricultura de precisión, este es un concepto agronómico que consiste en el manejo diferenciado de los cultivos a partir del conocimiento (a partir de observaciones y medidas) de la variabilidad existente en una explotación agrícola. Para caracterizar esta variabilidad se utilizan herramientas tecnológicas como los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS), sensores planta-clima-suelo e imágenes obtenidas a partir de satélites, aviones o UAV. El objetivo último de la agricultura de precisión es la obtención de mayores rendimientos económicos, medioambientales y sociales, aumentando la competitividad a través de una mayor eficacia de las prácticas agrícolas (Lelong et al., 2008; Montesinos, 2015a; Ngie et al., 2014; Shi et al., 2016).

Por lo tanto, en la agricultura de precisión los UAV son solamente las plataformas sobre las que se instalan los sensores que permiten obtener datos de una explotación

agrícola. No son el único tipo de plataforma, ya que como se ha mencionado, estos sensores pueden estar instalados en satélites o aviones. Todas estas plataformas ofrecen a los agricultores la capacidad de observar su explotación desde el aire, obteniendo una perspectiva de su cosecha que les permite detectar las incidencias en cada campaña agrícola. Sin embargo, debido a las características de las cámaras utilizadas y a la baja altura de los vuelos, los UAV permiten obtener una resolución espacial muy alta imposible de conseguir con sensores instalados en aviones o satélites, además de ofrecer una mayor disponibilidad temporal de estos datos (superior a los aviones y satélites, ya que al volar por debajo de las nubes las limitaciones meteorológicas son menores) (Berni et al., 2009; Gago et al., 2015; Lelong et al., 2008; Montesinos, 2015a; Nex et al., 2014; Peña et al., 2013; Raymond et al., 2010; Shi et al., 2016).

Algunas de las aplicaciones potenciales de los UAV en agricultura son las siguientes (Berni et al., 2009; Montesinos, 2015a; Portero et al., 2015; Shi et al., 2016): manejo eficiente del agua, tratamientos localizados de herbicidas, uso óptimo de fertilizantes, detección temprana de enfermedades y plagas en cultivos, supervisión de áreas fumigadas, indicadores de calidad en cultivos, generación de inventarios de cultivos, control de subvenciones agrarias, conteo de plantas, peritación de cultivos,.... Actualmente existen diferentes estudios de investigación sobre la aplicación de imágenes RGB, multiespectrales y térmicas obtenidas mediante UAV en diferentes cultivos, aunque es un ámbito que todavía está en vías de desarrollo.

Para este trabajo se ha seleccionado el cultivo de maíz como objeto de estudio, ya que se trata de uno de los principales cultivos a nivel mundial con una producción total de más de mil millones de toneladas en 2014 (FAO, 2016). Según las últimas estadísticas referidas a 2014, el país con más superficie dedicada a este cultivo es China (35.954.000 ha), seguido de cerca por Estados Unidos (33.644.310 ha). Otros países a destacar son Brasil, India, México, Nigeria y Argentina. España tiene una producción total de 4.692.000 toneladas y ocupa el puesto 52 en el ranking de superficie a nivel mundial (417.500 ha), pero el 11 en el ámbito de Europa. Sin embargo, en términos de rendimientos, asciende al tercer puesto europeo (FAO, 2016)

A nivel de comunidades autónomas de España, la comunidad con más superficie de cultivo de maíz es Castilla y León (118.438 ha), mientras que la Comunidad Foral de Navarra es la séptima región de España tanto en superficie cultivada como en producción, con una producción de 238.899 toneladas y 20.995 ha cultivadas (MAGRAMA, 2016).

En cuanto a las etapas fonológicas del maíz, se diferencian dos etapas en el desarrollo de la planta: el desarrollo vegetativo (V) y el desarrollo reproductivo (R). Dentro del desarrollo vegetativo se diferencian 19 subdivisiones (hasta el panojamiento), mientras que en el desarrollo reproductivo se diferencian 6 (Fassio et al., 1998).

En este tipo de cultivo el uso de la teledetección resulta especialmente interesante, ya que debido al gran porte del cultivo a partir de cierto estado de desarrollo la entrada a la parcela resulta complicada, dificultando la identificación de afecciones en su interior. Por otra parte, los costes de producción para este cultivo son elevados, por lo que en explotaciones de grandes extensiones un pequeño ahorro por hectárea supone

un aumento sustancial en el beneficio económico, haciendo la técnica más interesante al productor (Portero et al., 2015).

Hasta la fecha, el cultivo del maíz se ha investigado fundamentalmente en los siguientes campos (Ngie et al., 2014; Portero et al., 2015): detección de malas hierbas (Peña et al., 2013, López-Granados, 2010), estimación de variables biofísicas, determinación del estrés hídrico (Berni et al., 2009; Gago et al., 2015; Genc et al., 2013; Ramachandiran et al., 2015), fertilización nitrogenada (Quemada et al., 2014; Ramachandiran et al., 2015; Schepers et al., 1996; Shaver et al., 2015; Siratsuchi et al., 2012) y estimación de la producción (Shanahan et al., 2001; Sharma et al., 2015).

## 2.1- Estado del arte

Para realizar este trabajo se ha consultado y analizado información de diferentes trabajos realizados en maíz y, en algunos casos, en otros cultivos. La mayoría de estos trabajos se centran en el uso de imágenes térmicas y multispectrales para la obtención de información acerca del estado de la vegetación en general y del cultivo de maíz en particular, aunque también se han tenido en cuenta otros más genéricos sobre el cultivo del maíz con el objetivo de obtener más información acerca de este tipo de cultivos.

### 2.1.1- Comportamiento espectral de la vegetación

Para entender el uso de imágenes multispectrales en la obtención de información acerca del estado de la vegetación, es necesario conocer el comportamiento espectral de esta y analizar cómo afectan a este comportamiento los diferentes estreses a los que puede estar sometida la vegetación.

El comportamiento espectral de la vegetación varía en función del tipo de hoja, pero existen unos patrones generales marcados por una baja reflectividad en el visible, alta en el infrarrojo cercano (NIR) y baja con presencia de algunos picos relativos en el infrarrojo medio de onda corta (SWIR) (Mefford, 2014; Genc et al., 2013).

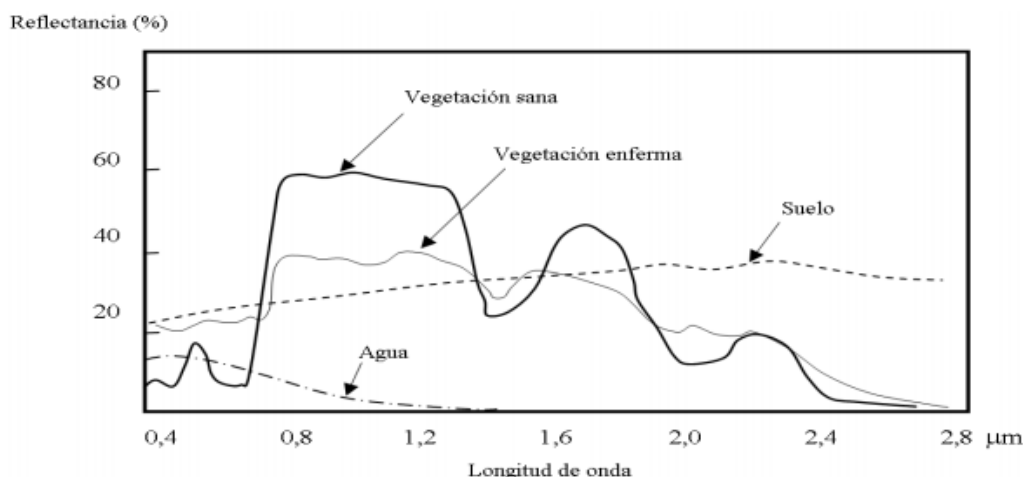


Figura 1: Comportamiento espectral de diferentes cubiertas (Fuente: Hernández et al.).

La vegetación presenta una baja reflectividad en la región visible del espectro debido al gran efecto absorbente de los pigmentos de las hojas (principalmente clorofilas, xantofila y caroteno) en estas longitudes de onda. Sin embargo, tiene un pico de



relativo de reflectividad en la región verde del espectro visible, ya que la absorción es menor a estas longitudes de onda.

La elevada reflectividad en el infrarrojo cercano se debe a la estructura celular interna de la hoja y a la baja absorción de la clorofila en estas longitudes de onda (Shaver et al., 2011; Ramos, 2015). Por ello, la vegetación sana ofrece una alta reflectividad en el NIR, que contrasta con la baja reflectividad que presenta en el espectro visible, especialmente en la banda roja.

A partir de 1,4  $\mu\text{m}$  el efecto absorbente de agua es muy claro, por lo que la reflectividad de la vegetación sana se reduce drásticamente en esta región del espectro.

Simplificando, se puede decir que en la vegetación sana existe un gran contraste entre la baja reflectividad del visible y la alta reflectividad del NIR. De ahí se puede enunciar como principio genérico que cuanto mayor sea este contraste mayor será el vigor de la vegetación y más clara su discriminación frente a otros tipos de cubierta.

Queda implícito que cualquier fuente de estrés en la vegetación se mostrará en forma de un comportamiento espectral más o menos alejado de lo anteriormente expuesto, ya que la vegetación enferma o que sufre algún tipo de estrés tiende a perder actividad clorofílica, y en consecuencia ofrece una menor absorción en las bandas azul y roja del espectro visible, lo que provoca que se elimine el máximo relativo en el verde. Por el contrario, en el NIR se produce una reducción de la reflectividad como consecuencia del deterioro en la estructura celular de la hoja. Además se ha comprobado que ciertos factores de estrés en la hoja están asociados a un desplazamiento en el límite del rojo (red Edge) hacia longitudes de onda más cortas.

### **2.1.2- Índices de Vegetación (IV)**

El comportamiento espectral teórico de la vegetación se ha utilizado para obtener los llamados índices de vegetación (IV), muchos de los cuales se basan en la diferencia de reflectividad entre las bandas NIR y roja.

Los índices de vegetación se pueden definir como combinaciones matemáticas de diferentes bandas espectrales, que pretenden extraer de los mismos la información relacionada con la vegetación, minimizando la influencia de perturbaciones como las debidas al suelo o a las condiciones atmosféricas. Estos IV han ido mejorando con el tiempo y se han relacionado con diferentes parámetros de la vegetación como el contenido de clorofila, IAF (Índice de Área Foliar),... (Mefford, 2014). Por lo tanto, los IV pueden ser utilizados para cuantificar parámetros biofísicos de la vegetación.

El índice de vegetación ideal fue descrito por Jackson et al. (1983) como "aquél particularmente sensible a la cubierta vegetal, insensible al brillo y color del suelo y poco afectado por la perturbación atmosférica, los factores medioambientales y las geometrías de la iluminación y de la observación", pero evidentemente el IV ideal no existe (Gilabert et al., 1997).

### **2.1.3- Causas de estrés en la vegetación**

El estrés en la vegetación puede deberse entre otros factores a plagas, enfermedades y deficiencias de agua o nutrientes (nitrógeno, potasio, fósforo,...) (Ngie et al., 2014). Sin

embargo, las causas de estrés que más se han investigado han sido el estrés hídrico debido a la falta de agua y el estrés nutricional debido a la falta de nitrógeno. Esto es debido a que tanto el agua como el nitrógeno son los principales elementos limitantes para el cultivo del maíz, y por lo tanto la fertilización nitrogenada y el riego son dos prácticas fundamentales para el incremento del rendimiento de cultivo (Maturano, 2002).

#### **- Estrés hídrico**

En cuanto al efecto del estrés hídrico en las plantas de maíz, investigaciones previas han determinado que en etapas tempranas del cultivo este tipo de estrés reduce el área foliar. Sin embargo, la etapa reproductiva es la más sensible a la presencia de un estrés hídrico, ya que en esta etapa del cultivo la deficiencia hídrica se manifiesta mediante la reducción en el número de granos por unidad superficie.

Por lo tanto, la utilización de técnicas de riego es uno de los elementos más importantes para lograr el máximo rendimiento económico y la mayor eficiencia en el uso del agua. Para una correcta programación del riego es necesario conocer la respuesta del cultivo en cada momento y así saber la cantidad de agua a aplicar en cada riego. En cuanto al aspecto medioambiental, una correcta programación del riego tendrá como objetivo ahorrar agua y prevenir excesos de agua en el perfil del suelo que puedan conducir a problemas sanitarios (como enfermedades causadas por hongos o plagas) o a la contaminación de aguas subterráneas (Maturano, 2002).

Respecto al efecto que produce el estrés hídrico en el comportamiento espectral de la vegetación, se ha comprobado en diferentes estudios la relación existente entre la reflectividad en el SWIR y el contenido de humedad en las hojas, lo que permite detectar zonas afectadas por estrés hídrico (Ngie et al., 2014; Ormeño, 2006). Como se ha mencionado en el apartado anterior, a partir de la longitud de onda 1,4  $\mu\text{m}$  el efecto absorbente de agua es muy claro, por lo que la reflectividad de la vegetación sana se reduce en esta región del espectro.

En la región visible del espectro, las plantas que sufren estrés hídrico tienen mayor reflectividad que las plantas que no están sometidas a este tipo de estrés, mientras que en la región del NIR ocurre lo contrario, es decir, las plantas estresadas presentan menor reflectividad que las no estresadas (Ngie et al., 2014; Genc et al., 2013; Ramachandiran et al., 2015; Manivasagam et al.).

Por otra parte, resulta interesante la monitorización de la temperatura de la cubierta para detectar la presencia de un estrés hídrico en las plantas (Gago et al., 2015; Maturano, 2002; Baluja et al., 2012; Berni et al., 2009), basándose en que el agua transpirada se evapora y enfría las hojas a una temperatura inferior a la del aire que las rodea. A medida que la disponibilidad hídrica es limitante, la transpiración se reduce y la temperatura de la cubierta aumenta. Si el agua transpirada es escasa, la temperatura foliar aumenta por encima de la temperatura del aire debido a la radiación absorbida (Gonzalez-Dugo et al. 2013; Jones et al., 2009; Maturano, 2002; Moller et al., 2006; Leinonen et al., 2004; Li et al., 2008).

En consecuencia, la temperatura de la cubierta es el mejor indicador del estrés hídrico en planta, sobre todo durante los primeros estados de estrés. Sin embargo, a medida que el cultivo alcanza una temperatura varios grados superior a la del aire, la

diferencia de temperatura es insensible a los cambios en el potencial agua. Basándose en este principio se han desarrollado diferentes índices para monitorizar el grado de estrés hídrico en los cultivos. Uno de los más destacados es el índice CSWI (Crop Water Stress Index), el cual se basa en las diferencias de temperatura entre el cultivo y el aire. (Taghvaeian et al., 2012; Li et al., 2008; Baluja et al., 2012; Gonzalez-Dugo et al., 2013, Li et al., 2008)

Por lo tanto, el uso de imágenes térmicas (termometría infrarroja) resulta muy interesante para la detección del estrés hídrico, ya que este tipo de imágenes permite obtener la temperatura de las cubiertas sin necesidad de tener contacto directo con el cultivo. Este tipo de imágenes tiene una ventana sensible para la medición en el rango de los 8-14  $\mu\text{m}$  de longitud de onda.

En diferentes estudios se ha demostrado que el mejor momento del día para la cuantificación del estrés hídrico mediante la utilización de la temperatura de la cubierta es el mediodía solar (Gonzalez-Dugo et al., 2013; Maturano, 2002).

#### **- Estrés nutricional**

El nitrógeno (N) es el nutriente más importante que limita la producción de cultivos, y por lo tanto es el que más extensamente ha sido estudiado a nivel mundial (Maturano, 2002; Quemada et al., 2014; Schepers et al., 1996). En el caso del maíz, este tipo de cultivo requiere grandes cantidades de N, por lo que es un factor importante que afecta al crecimiento y rendimiento de la planta. Cuando la provisión de N es inferior a la óptima el crecimiento es reducido, y en casos extremos en los que la deficiencia de N es muy grave puede provocar una disminución del IAF de hasta el 30% y una reducción de la biomasa de hasta el 25% (Maturano, 2002).

El objetivo de la fertilización nitrogenada es ajustar la oferta de N (el disponible en el suelo, el agregado mediante fertilizante y el agregado con el agua de riego) a la demanda con el objetivo de mejorar la eficiencia de la fertilización para que la plantación tenga un buen rendimiento, asegurando así los objetivos de producción y la rentabilidad económica del cultivo (Maturano, 2002; Quemada et al., 2014). Sin embargo, el exceso de aplicación de estos fertilizantes tiene efectos adversos en la calidad ambiental, además de un gasto que el agricultor podría evitar (Portero et al., 2015).

En diferentes estudios se ha demostrado la relación que existe entre la cantidad de nitrógeno disponible en el suelo con el contenido de nitrógeno y clorofila almacenada en las hojas (Quemada et al., 2014; Shaver et al., 2011; Schepers et al., 1996). De esta manera, cuando la dosis de nitrógeno aumenta, también aumenta la cantidad de este y de la clorofila en las hojas. La relación entre la concentración de clorofila y de nitrógeno en las hojas de la planta de maíz permite detectar deficiencias de nitrógeno en el cultivo a través de datos de reflectividad (Ramos, 2015). Esto se debe a que las plantas con mayor cantidad de clorofila en las hojas producen valores menores de reflectividad en la región visible del espectro, debido a la absorción de las moléculas de clorofila en estas longitudes de onda (Ramos, 2015; Ramachandiran et al., 2015).

También se ha demostrado la relación entre la disponibilidad hídrica del cultivo y la capacidad de absorción de nitrógeno, siendo esta capacidad mayor cuanto mayor es la

disponibilidad hídrica (Maturano, 2012). Por lo tanto, el estrés hídrico y el estrés nutricional están relacionados.

#### **2.1.4- Trabajos relacionados**

Hasta la fecha se han realizado diferentes estudios sobre cultivos de maíz, de los que se han destacado los siguientes por la estrecha relación que mantienen con el estudio realizado en este trabajo:

- Kemerer et al. (2007) evaluaron la sensibilidad de distintos índices espectrales al IAF en cubiertas de maíz. Determinaron relaciones exponenciales entre el IAF y los índices NDVI 670 y MSAVI, que se saturaron para valores de IAF superiores a 3, limitando su uso hasta la etapa de crecimiento V8. El NDVI 710 y el GNDVI presentaron un comportamiento logarítmico, alcanzando la saturación para valores de IAF superiores a 4, prolongando su utilidad hasta V10. Únicamente los índices REIP y R800/R550 presentaron relaciones lineales y pudieron ser usados durante todo el ciclo de crecimiento del cultivo. En cuanto a estos dos índices, para el cálculo del REIP son necesarias las reflectividades del NIR, rojo y dos bandas del RedEdge, mientras que para el cálculo de R800/R550 solo se utilizan las bandas NIR y verde.

- Isla y López-Lozano (2005) compararon diferentes índices de vegetación para la detección de deficiencias de nitrógeno en el maíz. Los resultados sugieren que es posible la detección de grandes carencias de nitrógeno mediante índices de vegetación, pero no se obtiene una clara diferenciación entre dosis de abonado próximas al óptimo.

- K. Sharma et al. (2015) compararon los índices espectrales NDVI y RedEdgeNDVI para la predicción del rendimiento en plantaciones de maíz orientado a la fertilización de nitrógeno en estos cultivos. Para realizar el experimento utilizaron seis niveles diferentes de fertilización nitrogenada, realizando cuatro réplicas. Determinaron que ambos índices tenían una relación similar con el rendimiento hasta la etapa de crecimiento V6. Sin embargo, en la etapa V12 el índice RedEdgeNDVI ofreció una mejor relación con el rendimiento que el NDVI, indicando que sería un índice más apropiado en etapas de desarrollo posteriores.

- Shiratsuchi, L., Ferguson, R., Shanahan, J., Adamchuk, V., Rundquist, D., Marx, D., and Slater, G. (2011) evaluaron diferentes índices de vegetación para detectar el estado nitrogenado en cultivos de maíz teniendo en cuenta que diferentes niveles de estrés hídrico afectan a la reflectividad del cultivo. Para ello utilizaron dos niveles de riego y cuatro niveles de fertilización nitrogenada. Determinaron que los índices DATT y MTCl son los menos afectados por el estrés hídrico y que sirven para discriminar diferentes niveles de fertilización. Los índices CI, NDVI y RedEdgeNDVI mostraron que están más afectados por el estrés hídrico y que tienen menor capacidad de discriminación entre diferentes cantidades de fertilización.

- Ramachandiran y Pazhanivelan (2015) realizaron un estudio para detectar el estrés hídrico y nutricional de plantaciones de maíz mediante índices de vegetación. Para ello utilizaron dos niveles de riego y cinco niveles de nitrógeno diferentes. Determinaron mediante un análisis de árboles de decisión que el NDVI era el índice más eficaz para evaluar el efecto combinado de nitrógeno y estrés hídrico en los cultivos de maíz.

- Genc et al. (2013) realizaron un estudio para determinar el estrés hídrico de plantaciones de maíz utilizando valores de reflectividad. Para ello utilizaron cuatro niveles de riego diferentes. Determinaron mediante un análisis de árboles de decisión que el IV más efectivo para determinar el estrés hídrico era el GNDVI junto con lecturas de clorofila.

- Quemada et al. (2014) realizaron un estudio para mejorar la fertilización nitrogenada en cultivos de maíz utilizando imágenes obtenidas mediante sensores hiperspectrales. Para realizarlo utilizaron seis niveles diferentes de fertilización nitrogenada, aplicándoles el mismo riego y realizando cuatro réplicas. Determinaron que aunque el NDVI estaba altamente correlacionado con la cantidad de clorofila, existían índices más precisos para diferenciar plantaciones con diferentes niveles de fertilización como por ejemplo los índices R750/710 y SIF760.

- Shaver et al. (2011) realizaron un estudio para determinar la relación entre el índice NDVI (obtenido mediante dos sensores diferentes) y la cantidad de nitrógeno en plantaciones de maíz de regadío. Para realizarlo utilizaron cuatro niveles diferentes de fertilización nitrogenada. Los resultados mostraron una gran correlación entre el NDVI y los diferentes niveles de fertilización aplicados en el cultivo.

## **2.2- Objetivos**

El objetivo general de este trabajo ha sido realizar el seguimiento de un cultivo de maíz a partir de imágenes adquiridas desde un UAV para monitorizar su estado durante las diferentes fases de su desarrollo. Para ello se han evaluado distintos índices de vegetación obtenidos a partir de imágenes RGB y multiespectrales. En este caso los IV utilizados para la realización de este trabajo han sido el NDVI, GNDVI, RedEdgeNDVI y NGRDI.

Como objetivo específico se ha planteado analizar si es posible diferenciar mediante índices de vegetación dos zonas con distintos tratamientos de riego, (1) convencional y (2) basado en medidas de campo de humedad del suelo.

De esta manera se quiere comprobar si los diferentes tratamientos de riego redundan en diferencias en el desarrollo del cultivo y si éstas son detectables mediante los índices de vegetación analizados.

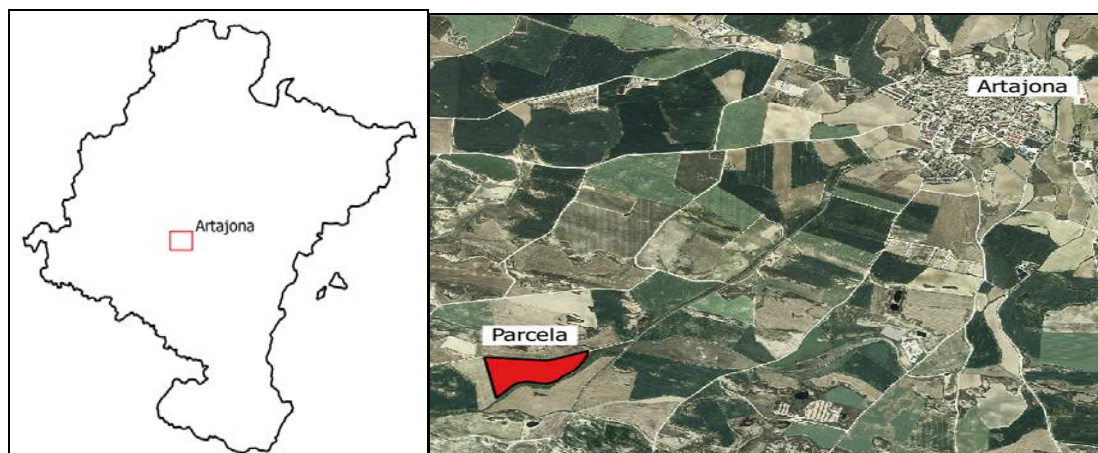


### 3- Materiales y métodos

#### 3.1- Zona de estudio

Para realizar este trabajo se ha utilizado una parcela agrícola de regadío situada en la localidad de Artajona (Navarra), por lo que se han obtenido diferentes imágenes de esta parcela a partir de un UAV. Esta parcela está cultivada con maíz, el tipo de cultivo del cual se ha realizado el seguimiento en este trabajo.

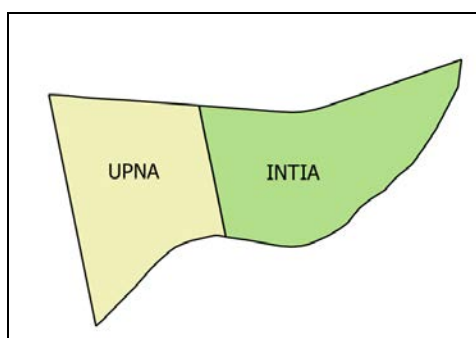
La parcela de estudio obtiene agua para el regadío a partir del Canal de Navarra, que nace en el embalse de Itoiz, sobre el río Irati al este de la cuenca de Pamplona. Este canal recorre gran parte del territorio de la Comunidad Foral para llevar agua a terrenos demandantes de la zona media y sur de Navarra.



*Figura 2: Localización de la parcela de estudio*

La parcela de estudio ( $42^{\circ} 34' 12''$  N,  $1^{\circ} 47' 40''$  W, datum WGS84) consta de 10,16 Ha cultivadas. La plantación del maíz se realizó el 1/mayo/2016 dejando una distancia de 0,7 metros entre hileras. Según el mapa geológico, el suelo de esta finca está formado por arcillas, arenas y gravas. En cuanto a la topografía se refiere, la parcela no presenta mucho relieve, ya que entre el punto más alto y el punto más bajo de esta existe una diferencia de altura de 6 metros.

En esta parcela se han implementado dos tratamientos de riego, regando la mitad de la parcela (zona este) según las recomendaciones facilitadas por el INTIA que se siguen de forma convencional en amplias zonas de Navarra (la gestión del riego la ha llevado la cooperativa de Artajona) y la otra mitad (zona oeste) mediante un método basado en datos de humedad obtenidos a partir de sondas situadas en el suelo de la parcela (gestionado por la UPNA).



*Figura 3: División de la parcela de estudio en tratamientos de riego.*

Por otra parte, también se ha comprobado que la parcela se encuentra en una zona que cumple la legislación para poder realizar vuelos con UAVs. Las principales consideraciones que se exponen en el reglamento para UAVs con un peso entre 2kg y 25kg (como es el caso de los UAV utilizados) son las siguientes (AESA, 2016):

- Las zonas permitidas para operar serán aquellas que se encuentren fuera de núcleos urbanos, parques naturales, aglomeraciones de personas al aire libre y siempre en espacio aéreo no controlado.
- Se deberá operar de día y en condiciones meteorológicas visuales.
- Altura máxima: 120 metros (sobre el terreno).
- Distancia máxima: 500 metros desde el operador.

### **3.2- Materiales**

#### **3.2.1- UAV**

Los UAV utilizados para realizar los vuelos de este trabajo han sido los UAV de tipo multirrotor Phantom 4 y Aeri One, siendo este último un modelo diseñado y fabricado por la empresa Technidrone. Estos dos UAV tienen dos modos de uso: el modo manual y el modo automático (mediante rutas establecidas previamente).

La principal diferencia entre ambos es que el modelo Aeri One permite la integración de diferentes sensores (multiespectral, térmico,...), mientras que el modelo Phantom 4 tiene su propia cámara RGB integrada, por lo que no es posible acoplarle ningún otro sensor.

Las ventajas de este tipo de UAV multirrotor frente a los UAV de ala fija son que los primeros pueden mantenerse estáticos en el aire, además de que tienen mayor maniobrabilidad y precisión de vuelo, los despegues y aterrizajes verticales son más sencillos (requieren menos espacio de despegue y aterrizaje) y su diseño permite embarcar cargas más voluminosas en proporción con su tamaño, además de que cambiar los sensores suele ser más sencillo en general. Sin embargo, el rendimiento (Ha por vuelo) suele ser menor comparándolo con el rendimiento de los UAV de ala fija, ya que entre otros factores su autonomía y velocidad suelen ser menores (Oñate de Mora, 2015; Gago et al., 2015). Debido a estas diferencias, los UAV de tipo multirrotor son más utilizados en el ámbito de la ingeniería civil (incluyendo la agricultura de precisión), mientras que en el ámbito militar los de tipo ala fija son mucho más utilizados (Oñate de Mora, 2015).



*Figura 4: UAVs utilizados en el trabajo. A la izquierda el modelo Aeris One (Fuente: Technidrone, 2016) y a la derecha el modelo Phantom 4 (Fuente: Dji, 2016).*

Las características técnicas más importantes de estos UAV son las siguientes (Dji, 2016; Technidrone, 2016):

**- Aeris One**

- Tipo de UAV: multirrotor
- Peso: 5Kg
- Carga de pago: 0,5 Kg
- Autonomía: 30 minutos
- Velocidad máxima: 10m/s
- Motor: 4 motores brushless
- Batería: 1 batería de 6s 10000mah
- Antena GPS: ublox lea6h
- Antena radioenlace: Rfd900
- Frecuencia de comunicación: 2,4 ghz

**- Phantom 4**

- Tipo de UAV: multirrotor
- Peso (incluido batería): 1,380 kg
- Autonomía: 28 minutos
- Velocidad máxima: 20m/s
- Sistemas de satélites: GPS/GLONASS
- Batería: 6000 mAh LiPo 2S
- Frecuencia de comunicación: 2,4 ghz - 2,483 ghz
- Características de la cámara:
  - Sensor: CMOS (6,20 x 4,65 mm)
  - Resolución espectral: Color primario RGB
  - Distancia Focal: 3.6125 mm
  - Resolución: 4000 x 3000 píxel



- Tamaño de píxel: 0,00155 mm (2,21  $\mu\text{m}$ )
- Sensibilidad: ISO 100 – ISO 1600
- Velocidad de obturador: 1/8000 s – 8 s

### 3.2.2- Cámara

#### - Parrot Sequoia

La cámara multispectral utilizada para este trabajo ha sido la cámara Parrot Sequoia. Esta cámara tiene cuatro sensores monócromos que recogen información en cuatro regiones diferentes del espectro electromagnético (Verde, Rojo, RedEdge y NIR), además de un sensor RGB.

Además, esta cámara cuenta con un sensor solar, el cual mide y registra de forma continua durante el vuelo las condiciones de luz en las mismas bandas del espectro que los sensores monócromos. Gracias a este sensor, todas las imágenes y bandas se normalizan a las mismas condiciones.

Por otra parte también cuenta con una tarjeta de calibración para poder calibrar las imágenes radiométricamente y así obtener valores de reflectividad.



*Figura 5: Cámara multispectral Parrot Sequoia y el sensor solar de ésta (Fuente: Parrot, 2016).*

Características principales de la cámara Parrot Sequoia (Parrot, 2016):

- Peso: 72 g (sensores monocromos y RGB)+ 35 g (sensor solar)
- Sistema GPS/GNSS integrado
- Sensores monócromos:
  - Tamaño del sensor: 4,6 x 3,6 mm
  - Resolución: 1280 x 960 píxel (1,2 Mp)
  - Tamaño de píxel: 0,00375 mm (3,75  $\mu\text{m}$ )
  - Distancia focal: 3,98 mm
  - Resolución espectral:
    - Verde: 550 nm (Ancho de banda: 40 nm)
    - Rojo: 660 nm (Ancho de banda: 40 nm)
    - Red Edge: 735 nm (Ancho de banda: 10 nm)
    - NIR (Infrarrojo cercano): 790 nm (Ancho de banda: 40 nm)

- Sensor RGB:
  - Distancia focal: 4,88 mm
  - Resolución: 4608 x 3456 píxel (16 Mp)
  - Tamaño de píxel: 0,00134 mm (1,34  $\mu$ m)

### 3.3- Métodos

#### 3.3.1- Planificación de los vuelos

Antes de realizar la planificación de un vuelo mediante UAV es necesario conocer y tener en cuenta la legislación vigente sobre este tipo de vuelos para comprobar si la zona de estudio cumple la legislación para poder realizar vuelos mediante este tipo de aeronaves.

Una vez comprobado que las zonas de vuelos cumplen la legislación, se han planificado los vuelos para las diferentes fechas. En este caso la planificación ha sido la misma para todas las fechas, ya que al tratarse de un estudio multitemporal la zona de estudio ha sido siempre la misma. Lo único que ha cambiado han sido las cámaras utilizadas, ya que se han utilizado la cámara RGB del UAV Phantom y la cámara multiespectral Parrot Sequoia con el UAV Aeris One.

Los factores más importantes a tener en cuenta en la planificación de un vuelo son el GSD (*Ground Sample Distance*), los solapes (longitudinal y transversal) y el relieve del terreno, ya que este último tiene influencia en los dos anteriores (Pérez, 2001).

##### - GSD

El GSD es la distancia que corresponde a cada píxel en el terreno, y depende de la distancia focal de la cámara ( $f$ ), la altura del vuelo ( $H$ ) y el tamaño de píxel.

$$GSD = \frac{H * \text{tamaño píxel}}{f}$$

En este caso, como se han utilizado diferentes cámaras (con focal y tamaño de píxel diferentes), se ha tenido que realizar la planificación para cada una de ellas, teniendo en cuenta que la altura de todos los vuelos ha sido la misma (120 metros sobre el nivel del suelo).

- GSD calculado para la cámara del UAV Phantom 4:

$$GSD = \frac{120000 * 0,00155}{3,6125} = 51,49mm = 5,15cm$$

- GSD calculado para los sensores monocromos de la cámara multiespectral Parrot Sequoia:

$$GSD = \frac{120000 * 0,00375}{3,98} = 113,06mm = 11,3cm$$

En cuanto a la relación del GSD con el número de fotogramas necesarios para conseguir el solape de un determinado área, es necesario recordar que para obtener un valor menor de GSD (mayor resolución espacial) es necesario volar a una altura

menor, lo que implica que el número de fotogramas necesarios para una misma área sea mayor.

#### - Solape

Se denomina solape al recubrimiento entre diferentes imágenes, es decir, zonas que aparecen en más de un fotograma. En los vuelos fotogramétricos se diferencian el solape longitudinal (recubrimiento entre dos fotogramas sucesivos de una misma pasada) y el solape transversal (recubrimiento entre diferentes pasadas de un vuelo). El solape se suele medir en unidades de porcentaje (%) respecto al área total de cada fotograma. Este recubrimiento entre imágenes es imprescindible para poder generar MDS y ortofotografías a partir de las fotografías originales.

#### - Relieve

Es necesario tener en cuenta que tanto el GSD como los solapes (longitudinal y transversal) varían a causa del relieve de la superficie terrestre. En un vuelo realizado a una altura constante sobre el nivel del mar en una zona con relieve, se obtiene un valor de GSD mayor (menor resolución espacial) y un solape mayor en las zonas con menor altitud. En este caso las parcelas de estudio no presentan mucho relieve, por lo que la influencia de este factor fue mínima.

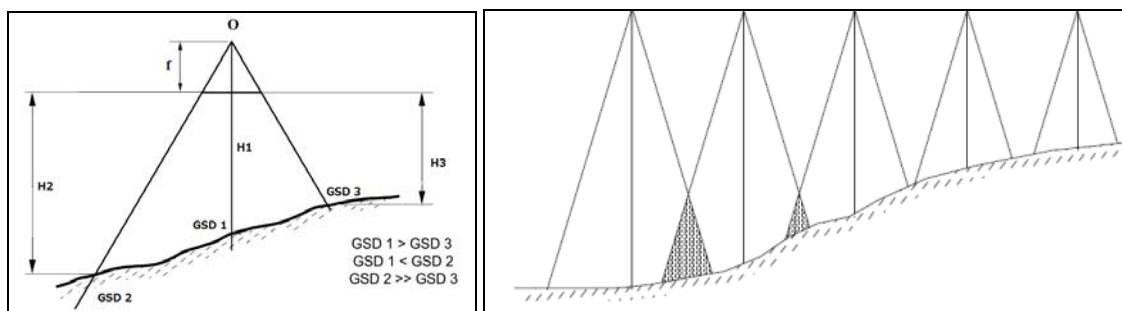


Figura 6: Influencia del relieve en el GSD (izquierda) y en los solapes entre diferentes imágenes (derecha) (Fuente: Pérez, 2001).

#### 3.3.1.1- Planificación de los vuelos mediante *Mission Planner*

La planificación de los vuelos para este trabajo se ha realizado mediante el software libre *Mission Planner*. Para realizar la planificación mediante este software el primer paso es introducir la zona de estudio, es decir, la zona que se quiere capturar con solape (que aparezca en más de una fotografía). Para esto se puede crear un nuevo polígono mediante las herramientas que ofrece el software o cargar un polígono ya definido. En cualquier caso, es recomendable utilizar un polígono mayor a la zona de estudio para dejar un margen de seguridad y así asegurar el solape en la zona de estudio.

Una vez creado el polígono que delimita la zona de estudio, es necesario introducir diferentes parámetros para poder realizar la planificación. Los más importantes son los parámetros de la cámara utilizada (focal, tamaño del sensor y resolución) y los parámetros del vuelo (altura de vuelo, velocidad de la aeronave, solape longitudinal y solape transversal). Una vez introducidos estos parámetros el software realiza la planificación del vuelo. Esta planificación incluye información sobre el número de pasadas y fotogramas a realizar, distancia entre fotogramas, tiempo entre diferentes

capturas, etc., además de mostrar gráficamente la planificación del vuelo. En este caso todos los vuelos se han planificado a 120 metros de altura con un solape longitudinal y transversal del 70%.

En el siguiente ejemplo se muestra el procedimiento seguido en la planificación del vuelo para la cámara Parrot Sequoia en la parcela de estudio:

#### 1- Delimitación del polígono que define la zona de estudio



Figura 7: Interface de Mission Planner con el polígono que delimita la zona.

#### 2- Introducción de los parámetros necesarios para la planificación del vuelo

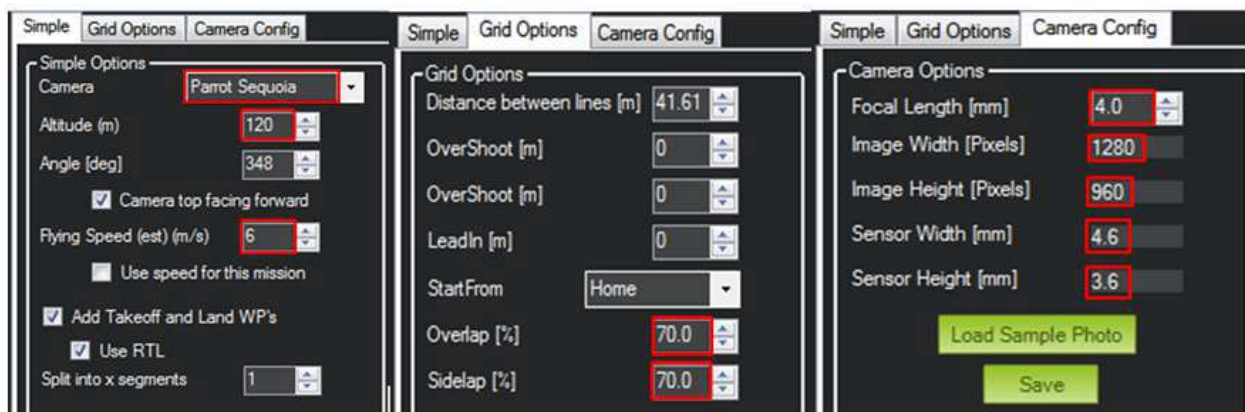


Figura 8: Interface de Mission Planner con los parámetros necesarios para la planificación del vuelo.

### 3- Representación gráfica de la planificación e información sobre el vuelo



*Figura 9: Representación gráfica de la planificación e información sobre el vuelo.*

#### 3.3.2- Realización de los vuelos

En total se han realizado 4 vuelos, uno con el UAV Phantom 4 y tres con la cámara multispectral Parrot Sequoia instalada en el UAV Aeris One.

En la siguiente tabla se muestran las fechas de los vuelos realizados y el equipo utilizado en cada uno de ellos:

*Tabla 1: Datos sobre los vuelos realizados para este trabajo.*

Nº Vuelo	Fecha	UAV	Cámara
1	31 de Mayo de 2016	Phantom 4	-----
2	22 de Junio de 2016	Aeris One	Parrot Sequoia
3	29 de Julio de 2016	Aeris One	Parrot Sequoia
4	27 de Agosto de 2016	Aeris One	Parrot Sequoia

En el vuelo realizado con el UAV Phantom 4, la cubierta vegetal era inexistente, por lo que se pudo obtener el MDT (Modelo Digital de Terreno). En cuanto a los vuelos realizados con la cámara multispectral, en el primer vuelo predominaba el suelo desnudo frente a la cubierta vegetal, mientras que en el resto ocurría lo contrario, ya que la cubierta vegetal ocupaba casi la totalidad de la parcela de estudio.

#### 3.3.3- Pre-Procesado de imágenes

Tanto en el caso de las imágenes obtenidas con la cámara Parrot Sequoia como con la cámara del UAV Phantom 4, las imágenes que se obtienen ya están georreferenciadas, por lo que no ha sido necesario realizar el pre-proceso de georreferenciación de las imágenes.



Sin embargo, en el caso de las imágenes obtenidas mediante la cámara Parrot Sequoia se han tenido que calibrar las imágenes radiométricamente para obtener valores de reflectividad de las cubiertas. Esta calibración se ha realizado utilizando la tarjeta de calibración de la cámara. Para esto es necesario capturar una fotografía de esta tarjeta antes de comenzar el vuelo (es importante que no existan sombras en esta al realizar la captura). Como los valores de reflectividad de la tarjeta de calibración son conocidos para las longitudes de onda de las bandas que utiliza la cámara Parrot Sequoia, las imágenes obtenidas en el vuelo se calibran respecto a esta imagen.

### 3.3.4- Procesado de imágenes

El procesado de las imágenes se ha realizado mediante el software comercial Pix4Dmapper. Mediante este software se han conseguido los MDS (solo en el caso de las imágenes RGB) y los ortomosaicos de las imágenes RGB y de cada uno de los sensores de la cámara multiespectral.

Aunque mediante este software se obtienen buenos resultados utilizando las opciones por defecto, resulta interesante conocer su funcionamiento para poder optimizar los resultados. Por lo tanto, para la realización de este trabajo se han analizado y valorado las diferentes opciones que ofrece el software con el objetivo de obtener unos resultados óptimos. En este caso, el software Pix4Dmapper divide el flujo de trabajo del procesado de imágenes en tres bloques (Pix4D, 2016):

- 1- Proceso inicial
- 2- Creación de la nube de puntos y de la malla
- 3- Creación del ortomosaico y MDS

En cada uno de los procesos existen diferentes opciones de trabajo que permiten optimizar los resultados. Los productos necesarios para la realización de este trabajo han sido los ortomosaicos y MDS, por lo que no ha sido necesario realizar el segundo paso, ya que este paso se realiza para obtener la nube de puntos densificada y la malla. Para obtener los ortomosaicos y MDS se utiliza una nube de puntos creada en el proceso inicial, pero como se ha mencionado no ha sido necesario densificarla.

En el proceso inicial existen diferentes opciones, siendo las que se muestran en la siguiente tabla las más importantes:

*Tabla 2: Opciones de Pix4Dmapper en el proceso inicial.*

Opción	Descripción y elección
Escala de la imagen para puntos homólogos ( <i>Keypoints Image Scale</i> )	Esta opción permite seleccionar el tamaño de la imagen que utilizará el software para buscar puntos homólogos. En este caso se ha seleccionado la opción por defecto, por lo que se ha utilizado el tamaño de toda la imagen.
Emparejamiento de imágenes ( <i>Matching Image Pairs</i> )	Esta opción permite seleccionar si las fotografías han sido obtenidas mediante un vuelo planificado (con solapes regulares) o mediante fotogrametría terrestre o vuelo libre. También existe una tercera opción en la que es necesario introducir parámetros más específicos para

	realizar los emparejamientos en los casos en los que no se obtengan resultados adecuados con las dos primeras opciones. En este caso se ha seleccionado la primera opción para optimizar el emparejamiento de imágenes según la trayectoria del vuelo.
Estrategia de emparejamiento ( <i>Matching Estrategy</i> )	Si se selecciona la opción de verificado geométrico en los emparejamientos de imágenes, el software utiliza las posiciones relativas de la cámara para descartar los puntos homólogos detectados que no son geoméricamente realistas. Al seleccionar esta opción el procesado es más robusto, aunque el tiempo de ejecución será mayor. En este caso se ha seleccionado con el objetivo de obtener un resultado más robusto.
Número de puntos homólogos dirigidos ( <i>Targeted Number of Keypoints</i> )	Esta opción permite seleccionar el máximo de puntos homólogos a extraer por cada imagen. En este caso no se ha establecido ningún número, dejando la opción por defecto.
Calibración ( <i>Calibration</i> )	Esta opción permite al usuario seleccionar como se optimizarán los parámetros externos e internos de la cámara. Este proceso consiste en realizar la aerotriangulación automática, el ajuste de bloques por haces y la auto-calibración de la cámara varias veces hasta conseguir una reconstrucción óptima. En este caso se ha seleccionado la opción por defecto tanto al seleccionar el método de calibración como al seleccionar la optimización de los parámetros internos y externos de la cámara, ya que para utilizar las otras opciones es necesario que las fotografías dispongan de una geolocalización muy precisa.
Reemparejamiento ( <i>Remactht</i> )	Permite al usuario añadir más emparejamientos además de los emparejamientos realizados anteriormente. Esta opción suele mejorar la calidad de la reconstrucción. En este caso se ha seleccionado la opción por defecto, por lo que se habilita la opción para proyectos con menos de 500 imágenes, como es el caso de los proyectos realizados para este trabajo.

En el proceso de la creación del ortomosaico y MDS, las diferentes opciones que ofrece el software se muestran en la siguiente tabla:

*Tabla 3: Opciones de Pix4Dmapper en la creación del ortomosaico y MDS.*

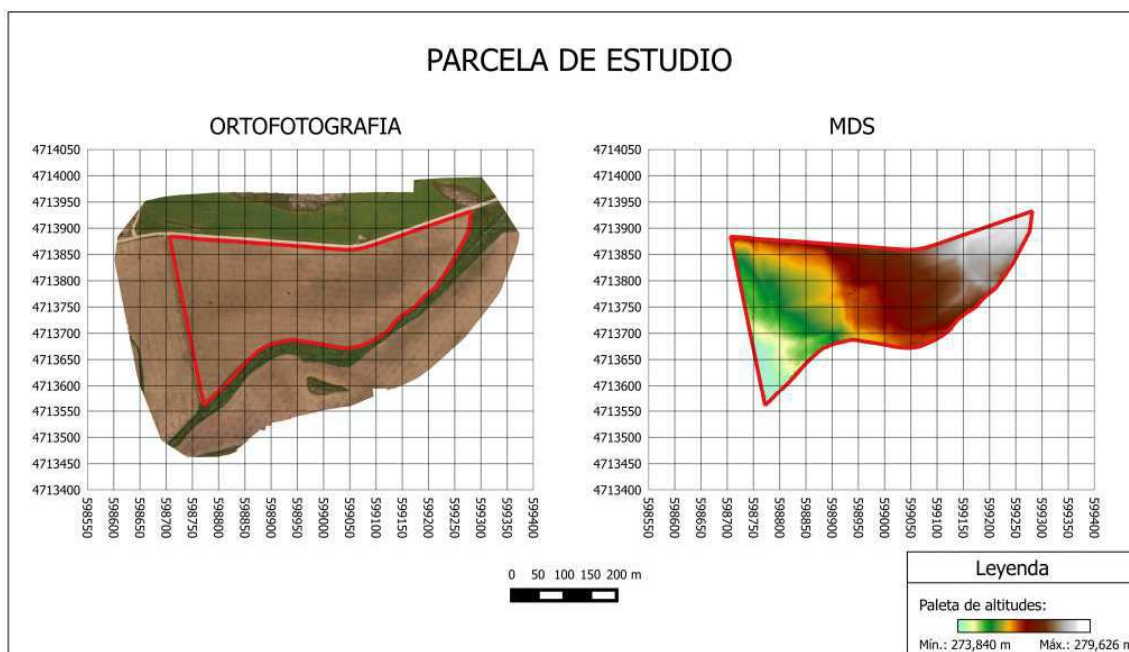
Opción	Descripción y elección
Resolución ( <i>Resolution</i> )	Permite al usuario definir la resolución espacial que tendrán el ortomosaico y el MDS generados. Para este trabajo se ha seleccionado la opción automática, por lo que se han generado con la misma resolución que el GSD.
Filtros MDS ( <i>DSM Filters</i> )	Permite definir filtros y suavizados a utilizar en la nube de puntos que se utilizará para la generación del MDS. La selección del filtro de ruido permite corregir la altitud de puntos erróneos basándose en la altitud de los píxeles vecinos. Una vez aplicado el filtro del ruido se genera el MDS utilizando la nube de puntos filtrada. La opción de suavizado permite suavizar la superficie generada. Existen tres opciones según el grado de suavizado que se desea obtener. En este trabajo se han aplicado tanto el filtro de ruido como el suavizado de la superficie, utilizando la opción por defecto (la opción que aplica el menor suavizado).
MDS ráster ( <i>Raster DSM</i> )	Permite seleccionar el método con el que se generara el MDS. En este caso hay dos opciones de interpolación disponibles: triangulación (basado en la triangulación Delaunay) e IDW ( <i>Inverse Distance Weighting</i> ). Para este trabajo se ha utilizado el método de triangulación, ya que es más recomendable para áreas planas (el método IDW es recomendable para generar MDS de edificaciones). También se ha seleccionado la opción que permite exportar el MDS en formato Geotiff.
Ortomosaico ( <i>Orthomosaic</i> )	En esta opción es posible seleccionar el formato de salida del ortomosaico además de algunos parámetros relacionados con la generación de éste. En este caso se ha seleccionado la opción para exportar la unión de los diferentes <i>tiles</i> o “baldosas”, ya que si no se selecciona se exportan los diferentes trozos del ortomosaico individualmente. En este caso se ha exportado en formato Geotiff, aunque también existe la opción de exportarlo en formato .kml.

Una vez realizados todos los procesos, Pix4dmapper genera un informe de calidad donde se puede ver la calidad de los resultados obtenidos.



### 3.3.4.1- Procesado de imágenes RGB

Utilizando las imágenes obtenidas mediante el UAV Phantom 4, se han obtenido la ortofotografía y el MDS de la parcela de estudio mediante Pix4Dmapper. El objetivo de realizar este proceso ha sido tener un mayor conocimiento acerca de la parcela de estudio.



*Figura 10: Ortofotografía y MDS de la parcela de estudio.*

### 3.3.4.1- Procesado de imágenes Multiespectrales

#### - Selección y cálculo de los IV

El primer paso para comenzar a trabajar con las imágenes multiespectrales obtenidas mediante la cámara Parrot Sequoia ha sido obtener los ortomosaicos de reflectividad de cada uno de los sensores que dispone esta cámara (Verde, Rojo, RedEdge y NIR).

Una vez conseguidos los ortomosaicos de reflectividad de las diferentes bandas mediante el software Pix4Dmapper, se han seleccionado los índices más apropiados para la realización de este trabajo basándose en los diferentes estudios y trabajos consultados en la bibliografía. Al realizar esta selección se han tenido que descartar algunos índices que han dado buenos resultados en diferentes estudios, ya que solo se han tenido en cuenta los índices que se pueden calcular con los recursos disponibles, es decir, con las cuatro bandas de la cámara multiespectral utilizada para este trabajo.

Los IV seleccionados para este estudio han sido los siguientes: NDVI, GNDVI, RedEdgeNDVI y NGRDI.

En este caso todos los IV utilizados son índices normalizados, por lo que el rango de valores que se obtiene es entre -1 y 1.

#### 1- NDVI (Normalized Vegetation Index)

El NDVI es un índice de vegetación sencillo y muy utilizado en teledetección (Mefford, 2014, Lelong et al., 2008). Se calcula a partir de la reflectividad en el rojo y en el infrarrojo cercano. Sin embargo, se ha demostrado que se satura para valores altos de

IAF (Kemerer et al., 2007; Mefford, 2014). Además, algunos estudios señalan que este índice puede ser inadecuado para evaluar la vegetación de cultivos, ya que está muy influenciado por el suelo (Shanahan et al., 2001; Mefford, 2014). Estos limitantes han llevado a que se desarrollen una serie de índices alternativos. La ecuación para calcular el NDVI es la siguiente:

$$NDVI = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{Red})}{(\rho_{NIR} + \rho_{Red})}$$

Aunque en diferentes trabajos se ha demostrado el potencial de este índice para determinar estrés en cultivos (Ramachandiran et al., 2015), se ha probado que no discrimina bien el estrés cuando el valor IAF de la vegetación es alto (Mefford et al., 2014). También se ha demostrado en diferentes estudios que el NDVI tiene una relación directa con la cantidad de N en una planta, siendo mayor la concentración de N a mayores valores de NDVI (Shaver et al., 2011).

## 2- GNDVI (Green Normalized Vegetation Index)

El GNDVI es un índice que se basa en el NDVI, pero en vez de utilizar la reflectividad de la banda roja utiliza la reflectividad de la banda verde. Este índice de vegetación se utilizó por primera vez debido a su sensibilidad a la concentración de clorofila en las hojas. Se comprobó que era más sensible a una amplia gama de concentraciones de clorofila que el NDVI original (Mefford, 2014), además de que no se satura tanto como el NDVI con valores altos de IAF (Shanahan et al., 2001).

Se han realizado diferentes estudios para la estimación de la cantidad de nitrógeno, IAF y RFA (Radiación Fotosintéticamente Activa) utilizando este índice (Lelong et al., 2008; Raymond et al., 2010). La ecuación para calcular el GNDVI es la siguiente:

$$GNDVI = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{Green})}{(\rho_{NIR} + \rho_{Green})}$$

## 3- RedEdgeNDVI (Red Edge Normalized Vegetation Index)

El IV RedEdgeNDVI también es similar al NDVI, pero en este caso en vez de usar la banda roja se utiliza la banda RedEdge. La región del espectro Red Edge es la región de máxima pendiente entre la reflectividad de la región del rojo y la del NIR, y tiene un gran potencial en agricultura. En diferentes estudios se ha demostrado que los IV que utilizan la Red Edge son más sensibles al contenido en clorofila, por lo que tienen una gran utilidad en la estimación de N (Sharma et al., 2015).

En otros estudios también se han obtenido mejores resultados que con el NDVI en etapas avanzadas del cultivo, por lo que puede resultar más útil (Sharma et al., 2015; Quemada et al., 2014; Ngie et al., 2014).

La ecuación para calcular el RedEdgeNDVI es la siguiente:

$$RedEdgeNDVI = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{RedEdge})}{(\rho_{NIR} + \rho_{RedEdge})}$$

#### 4- NGRDI (Normalized green red difference index)

El índice NGRDI también es un índice normalizado, pero a diferencia de los tres anteriores no se utiliza la región del NIR para su cálculo. Esta ha sido la principal razón para elegir este índice, ya que se han querido comparar índices posibles de obtener con los recursos disponibles y que no fueran muy similares. En este caso, en lugar de utilizar la banda del NIR se utilizan las bandas del visible roja y verde. Por lo tanto este índice se basa en la diferencia entre el pico relativo de reflectividad que tiene la vegetación en las longitudes de onda del verde y la baja reflectividad en las longitudes de onda del rojo.

La ecuación para calcular el NGRDI es la siguiente:

$$NGRDI = \frac{(\rho_{Green} - \rho_{Red})}{(\rho_{Green} + \rho_{Red})}$$

Este índice ha sido utilizado en diferentes estudios en los que se han relacionado índices espectrales con parámetros vegetales en cultivos de maíz (Díaz, 2015; Farrel et al., 2013).

##### - Ajustar polígono de la parcela a la zona de cultivo.

Como referencia de superficie de la parcela de estudio se ha utilizado el polígono obtenido a partir del SIGPAC. Sin embargo, este polígono no cubre exactamente la parcela de maíz, ya que al superponer las imágenes obtenidas con el polígono, se observa dentro de éste vegetación que no corresponde a la plantación de maíz, como por ejemplo la vegetación de las cunetas de la carretera. Para que esta vegetación no afecte a las estadísticas se ha modificado el polígono ajustándolo a la plantación de maíz. Para ello se ha utilizado la imagen del índice NDVI obtenida a partir de las imágenes del primer vuelo realizado (donde el maíz está en una etapa temprana de crecimiento), ya que se diferencian fácilmente las hileras que forman la plantación de maíz del resto de cubiertas.

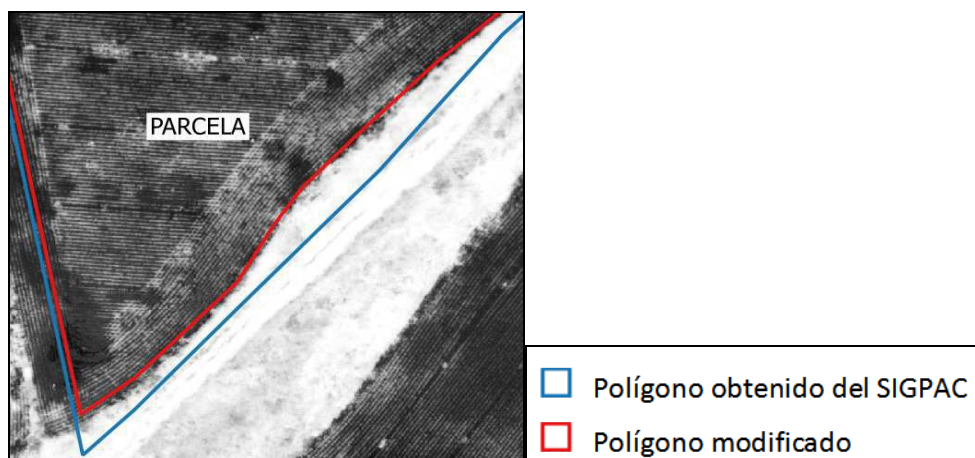
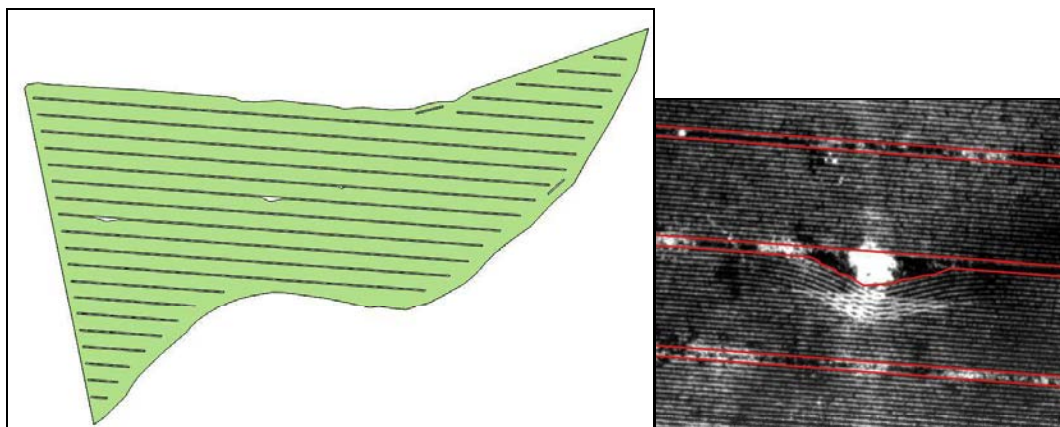


Figura 11: Modificación del polígono original de la parcela en los bordes superpuesto sobre el NDVI del primer vuelo.

### - Crear buffer en zonas no cultivadas.

Tras ajustar el polígono a la plantación de maíz, se han identificado y digitalizado en la imagen del índice NDVI del primer vuelo las líneas que unen los aspersores que se utilizan para realizar el regadío de la parcela. Se han creado buffers de 0,7 metros de estas líneas, ya que son zonas que el tractor no puede cubrir al realizar la plantación de las semillas de maíz, por lo que no existe cultivo. Además, se ha observado en una visita a campo la existencia de vegetación que no es maíz en las zonas donde están localizados los aspersores.



*Figura 12: A la derecha la vista general del buffer creado en las líneas que unen los aspersores y a la izquierda la imagen de detalle de los buffers creados superpuesta sobre la imagen del NDVI del primer vuelo.*

Por lo tanto, se han descartado estas zonas para que no afecten a las estadísticas que se desean obtener del cultivo de maíz. Tras definir los buffers, se le han quitado estas zonas al polígono que delimita el cultivo creado en el anterior paso.

Una vez creada la zona que delimita el cultivo del maíz, se han recortado las imágenes de los IV utilizados a esta zona.

### - Análisis de los IV

El análisis de los IV que se ha realizado en este trabajo se ha dividido en tres partes:

- Cálculo de la matriz de correlaciones entre IV: Se ha calculado la correlación entre los diferentes IV utilizados para este estudio. Esto se ha realizado con el objetivo de ver si los diferentes IV utilizados ofrecen información complementaria o por el contrario ofrecen una información similar. Para ello se han utilizado las imágenes de los IV recortadas con las zonas donde existe cultivo de maíz. Estos valores de correlación se han calculado a partir de los valores de los diferentes IV obtenidos en los tres vuelos realizados con la cámara multispectral.

- Gráfico de valores medios por fechas: Se ha calculado el valor medio de cada uno de los IV en la zona cultivada para cada uno de los diferentes vuelos realizados. A partir de los datos obtenidos se ha creado un gráfico donde se muestra el valor medio de cada IV para cada una de las fechas de vuelo.

- Cálculo de histogramas de IV: Se han calculado los histogramas de cada IV en cada uno de los vuelos realizados para poder ver la distribución de los datos obtenidos en cada caso, con el objetivo de comparar los datos entre las diferentes fechas de



vuelo. Como en el caso anterior, solo se han tenido en cuenta las zonas cultivadas para el cálculo de los histogramas.

#### - Diferencias entre zona INTIA y zona UPNA

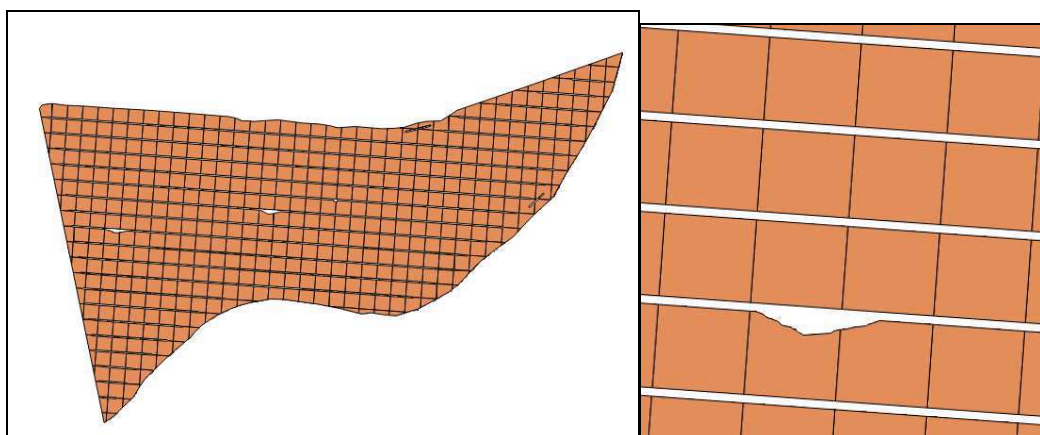
Para analizar las eventuales diferencias entre los dos tratamientos de riego (zona UPNA y zona INTIA), se han calculado las estadísticas básicas (mínimo, máximo, media y desviación estándar) para cada una de las zonas y para cada uno de los IV.

Por otra parte, también se han calculado los histogramas de cada IV en cada una de las zonas individualmente con el objetivo de analizar la distribución de los datos obtenidos en cada zona. Este proceso se ha realizado para cada uno de los vuelos realizados.

#### - Obtener mapas de vigor por cuadrículas

Para realizar los mapas de vigor, se ha creado una cuadrícula de 15 x 15 metros y se ha orientado en la misma dirección de las líneas que forman la unión de los aspersores (la dirección del tractor al realizar la plantación). Se ha escogido la distancia de 15 metros porque es la distancia entre las diferentes líneas que unen los aspersores. También se ha desplazado la cuadrícula para que las líneas de la misma coincidan con las líneas que forman la unión de los aspersores.

Una vez orientada y situada la cuadrícula, se ha recordado con la zona de cultivo y se han eliminado los polígonos con un tamaño inferior a 30 m<sup>2</sup>. Estos polígonos se han eliminado porque se ha considerado que tienen un tamaño demasiado pequeño y que podrían registrar información demasiado específica, dificultando la interpretación de los mapas generados.



*Figura 13: División de la zona de cultivo con una cuadrícula de 15x15m.*

Una vez filtrados los polígonos, se han extraído los valores de las imágenes de los diferentes IV a los polígonos. El valor asignado a cada polígono ha sido el valor medio que forman los píxeles que se encuentran en su interior.

Una vez asignados los valores medios de los diferentes IV a cada polígono, se les ha aplicado una paleta de color (Verde - Rojo) en función de este valor, siendo rojo los valores más bajos y verde los más altos. En este caso los polígonos se han clasificado en tres grupos (rojo, amarillo y verde).

Los rangos de cada clase se han establecido mediante la opción de rupturas naturales (*Natural Breaks*). Se ha utilizado esta opción para establecer los rangos de las diferentes clases porque en la parcela de estudio no existe demasiada variabilidad en

el cultivo, y esta opción es la que mejor representa esta variabilidad (mejor que intervalos iguales, geométricos,...), ya que los valores de corte entre clases se caracterizan porque agrupan mejor los valores similares y maximizan las diferencias entre clases. Esta clasificación se basa en el algoritmo de rupturas naturales de Jenks (ArcGIS, 2016).

Los diferentes mapas obtenidos utilizando la opción de rupturas naturales no son comparables entre sí, ya que en cada caso se calculan los valores de corte entre clases teniendo en cuenta los datos de ese caso en particular. Sin embargo, utilizando esta opción es posible visualizar gráficamente la variabilidad de la parcela con cada uno de los IV.

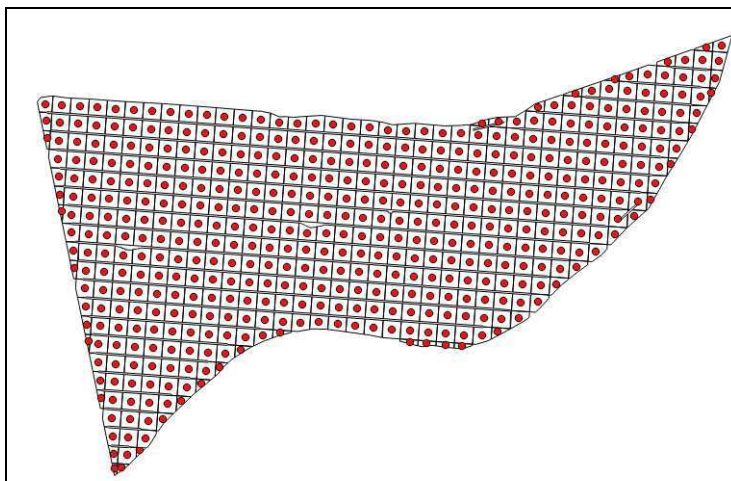
#### **- Seleccionar índice de vegetación óptimo**

En función de los resultados obtenidos y los diferentes estudios analizados para la realización de este trabajo, se han descartado algunos IV con el objetivo de elegir el IV óptimo para la realización de este trabajo. Es decir, el índice que mejor representa la variabilidad del cultivo durante todo su ciclo de desarrollo. La justificación de esta decisión se explica en el apartado de los resultados, junto con el análisis de estos.

#### **- Obtener mapa continuo de vigor**

Este proceso sólo se ha realizado con el índice de vegetación óptimo. Este proceso se ha dividido en dos apartados: el cálculo de los centroides y la interpolación TIN.

El primer paso ha sido calcular los centroides de los polígonos creados a partir de la cuadrícula de 15 x 15 metros. Estos puntos creados (centroides), al igual que los polígonos, contienen el valor medio de cada índice de vegetación calculado para cada polígono.



*Figura 14: Centroides de los polígonos creados a partir de la cuadrícula de 15x15m.*

Una vez creados los centroides de los polígonos, se han utilizado estos puntos para realizar una interpolación TIN con el objetivo de obtener una superficie continua que represente el estado del cultivo.

#### - Diferencias entre zonas de vigor alto y vigor bajo

Se han diferenciado las zonas de vigor alto y de vigor bajo a partir del valor medio del IV óptimo de toda la parcela. De esta manera se han considerado de vigor alto las zonas donde el valor del IV óptimo es superior a esta media y de vigor bajo las zonas donde el valor es menor.

Una vez separadas estas dos zonas en cada uno de los vuelos realizados, se han vectorizado y se han extraído para cada una de ellas los valores medios de los ortomosaicos de reflectividad de cada una de las bandas (verde, rojo, RedEdge y NIR). Con estos valores se ha creado un gráfico del comportamiento espectral del cultivo para cada uno de los vuelos con el objetivo de evaluar gráficamente la diferencia de reflectividad en cada una de las bandas entre las zonas consideradas como zonas de vigor alto y zonas de vigor bajo.

### 4- Resultados y discusión

#### 4.1- Análisis de Índices de Vegetación

##### - Correlación entre Índices de Vegetación

Los resultados obtenidos al calcular la correlación entre los diferentes IV en las zonas de cultivo utilizando los datos de todos los vuelos se muestran en la siguiente tabla:

*Tabla 4: Matriz de correlaciones entre índices de vegetación.*

	NDVI	GNDVI	RedEdgeNDVI	NGRDI
NDVI		0.996	0.971	0.957
GNDVI	0.996		0.977	0.948
RedEdgeNDVI	0.971	0.977		0.953
NGRDI	0.957	0.948	0.953	

Como se puede observar en los valores correlación obtenidos, todos los índices están altamente correlacionados, siendo el caso del NGRDI el índice con el cual se han obtenido los valores más bajos. Por lo tanto, este índice ofrece información algo diferente al resto. Por otra parte, también es de destacar la alta correlación que se ha obtenido entre los índices NDVI y GNDVI, llegando a ser casi una correlación perfecta.

También se han generado los siguientes gráficos para mostrar gráficamente la relación entre los diferentes IV.

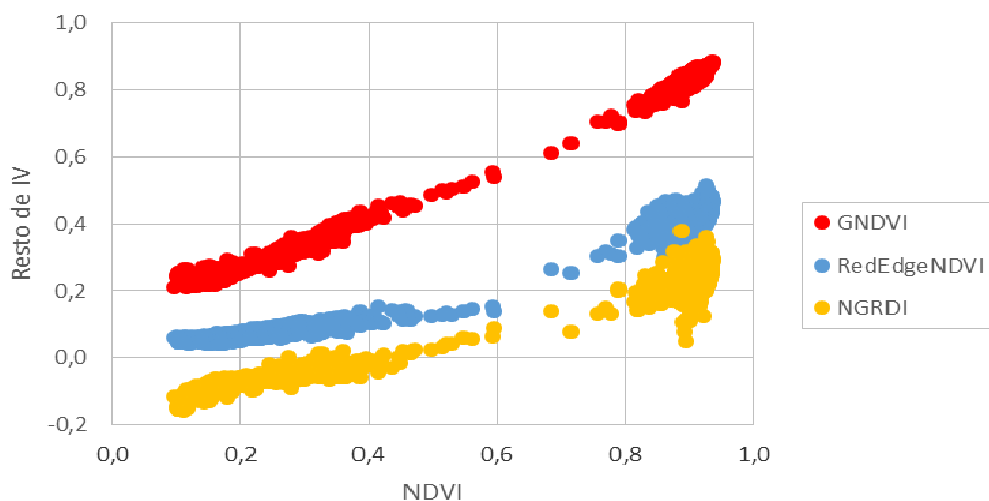


Figura 15: Correlación entre el NDVI y el resto de índices.

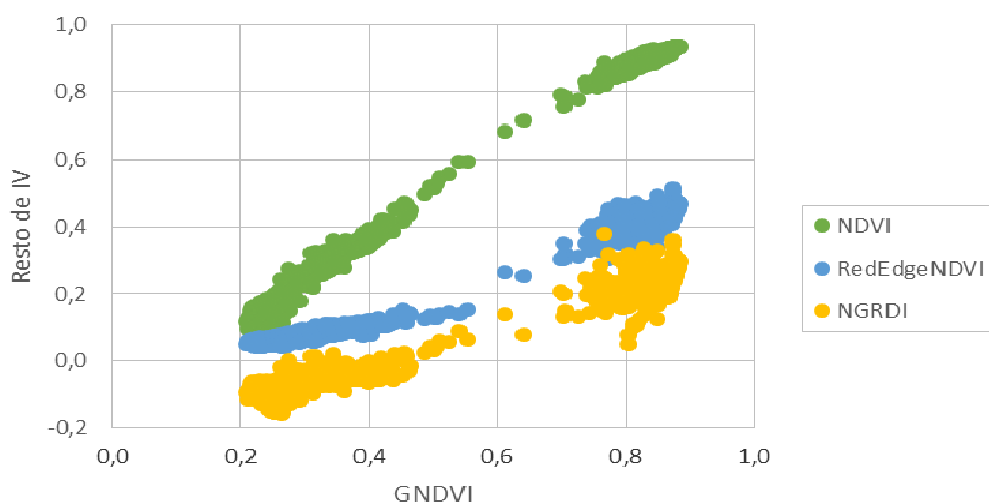


Figura 16: Correlación entre el GNDVI y el resto de índices.

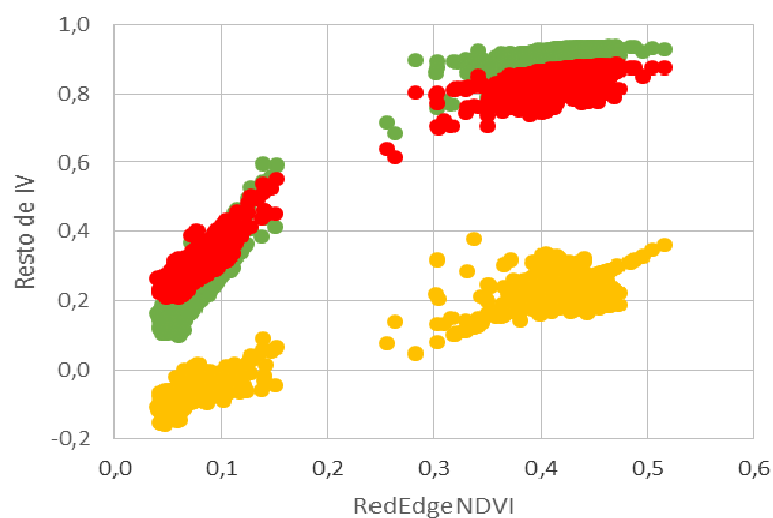
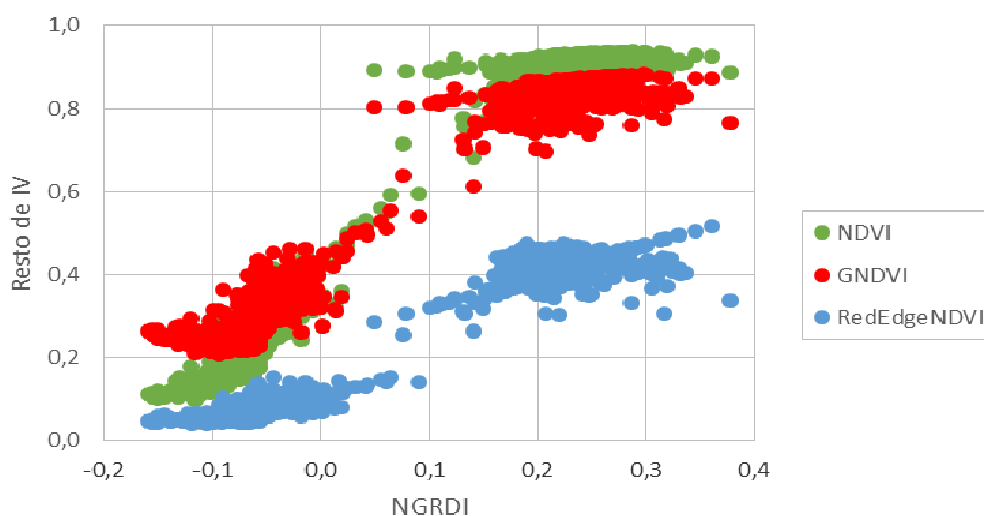


Figura 17: Correlación entre el RedEdgeNDVI y el resto de índices.



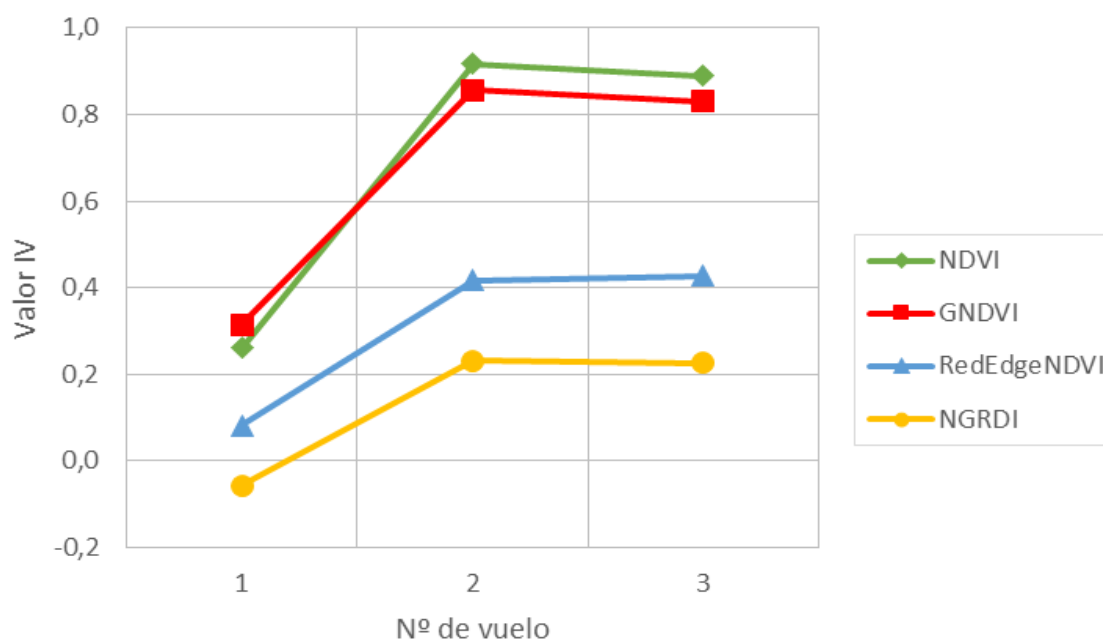


*Figura 18: Correlación entre el NGRDI y el resto de índices.*

En los gráficos de correlación entre índices que se han obtenido se puede ver claramente que cuando los IV tienen valores altos, el valor de los índices RedEdgeNDVI y NGRDI sigue aumentando mientras que el valor de los índices NDVI y GNDVI deja de aumentar, es decir, estos dos últimos se saturan. Por lo tanto, parece que los índices NDVI y GNDVI tienen un menor umbral de saturación en comparación con los índices RedEdgeNDVI y NGRDI, es decir, se saturan con una cantidad de IAF menor.

#### - Comportamiento medio por fecha

A partir del valor medio de cada uno de los IV en la zona cultivada para cada uno de los diferentes vuelos realizados, se ha creado el siguiente gráfico donde se muestra el valor medio de cada IV para cada una de las fechas de vuelo.



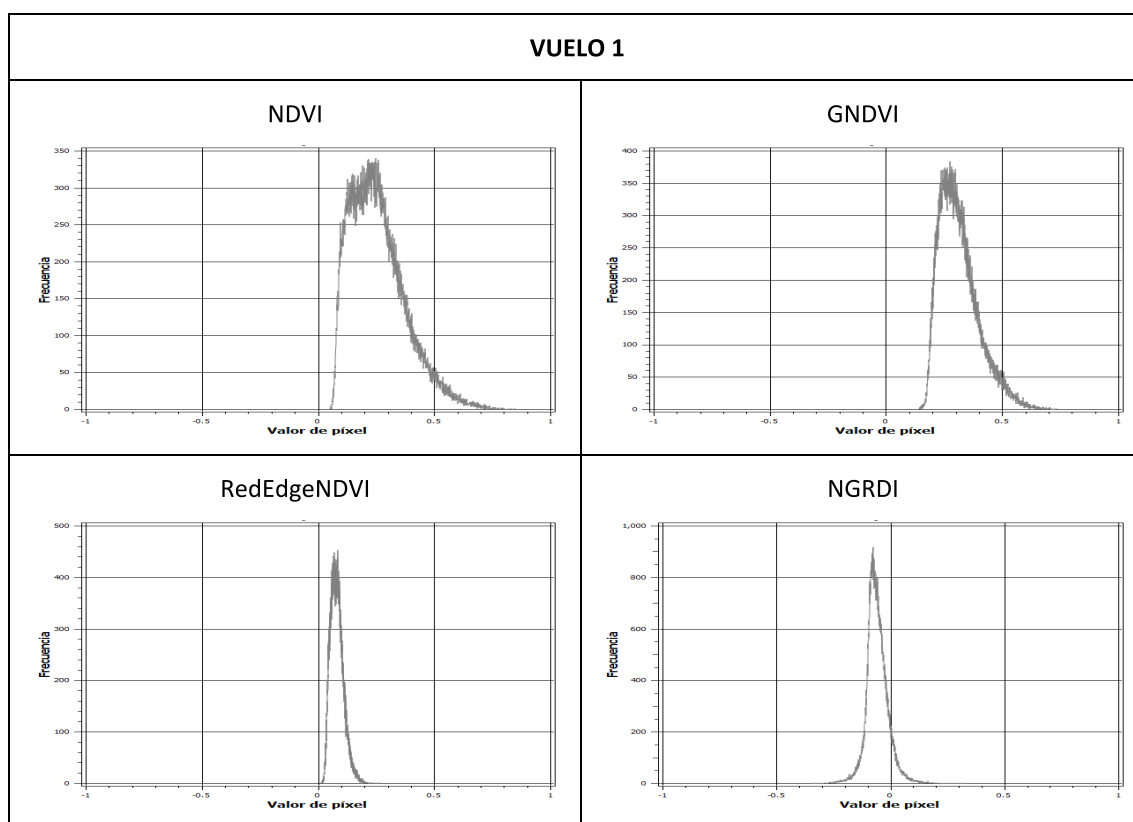
*Figura 19: Valores medios de los índices de vegetación por fecha.*

Como se puede observar, todos los índices siguen la misma tendencia aunque su rango de valores sea distinto. En el caso del NDVI y GNDVI este rango de valores es muy similar.

En cuanto a la tendencia que siguen todos los índices, se ve claramente que el valor medio de todos ellos aumenta desde la fecha del primer vuelo a la fecha del segundo vuelo. Sin embargo, los valores medios que se obtienen en el segundo y tercer vuelo son muy similares en todos los casos. Esto puede deberse a que estos IV se saturan con valores de IAF altos, ya que en las fechas de los vuelos 2 y 3 había mucha cubierta vegetal y este valor de IAF era alto.

### - Distribución de los Índices de Vegetación

Los histogramas obtenidos para cada IV en cada uno de los vuelos se muestran en las siguientes figuras:



*Figura 20: Histogramas de los índices de vegetación en el vuelo 1.*

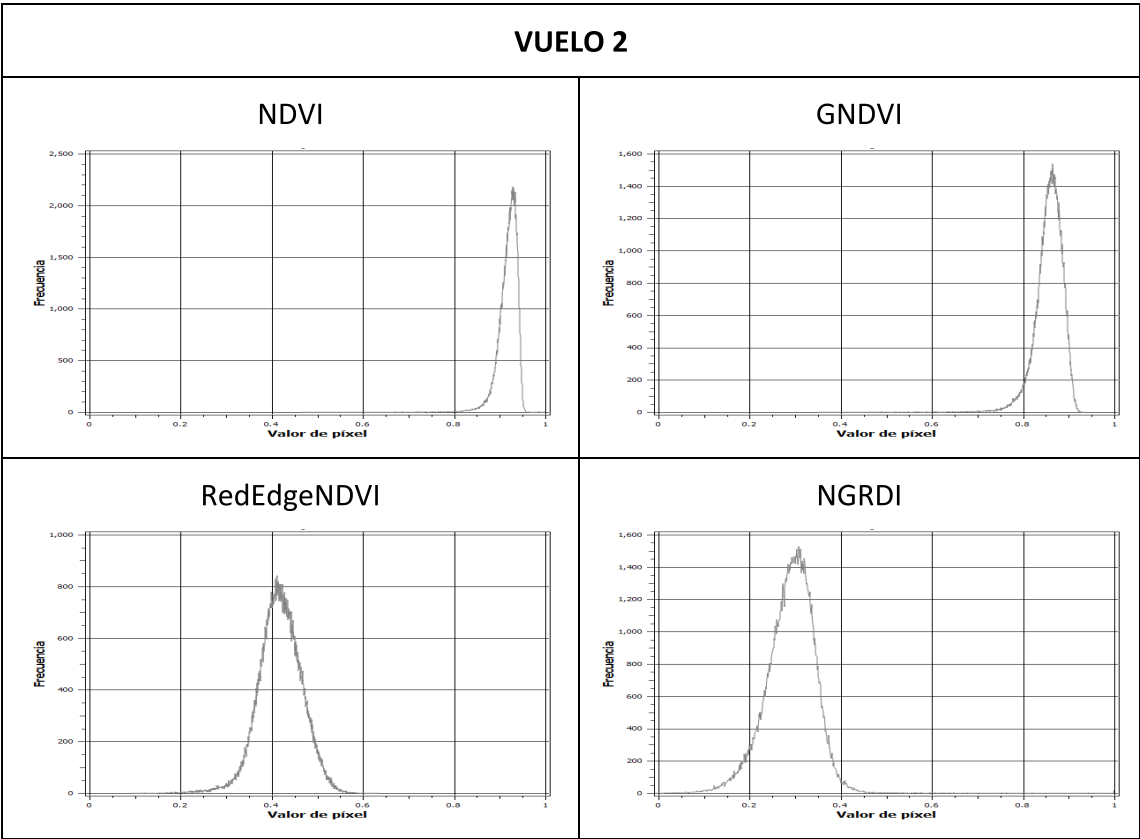


Figura 21: Histogramas de los índices de vegetación en el vuelo 2.

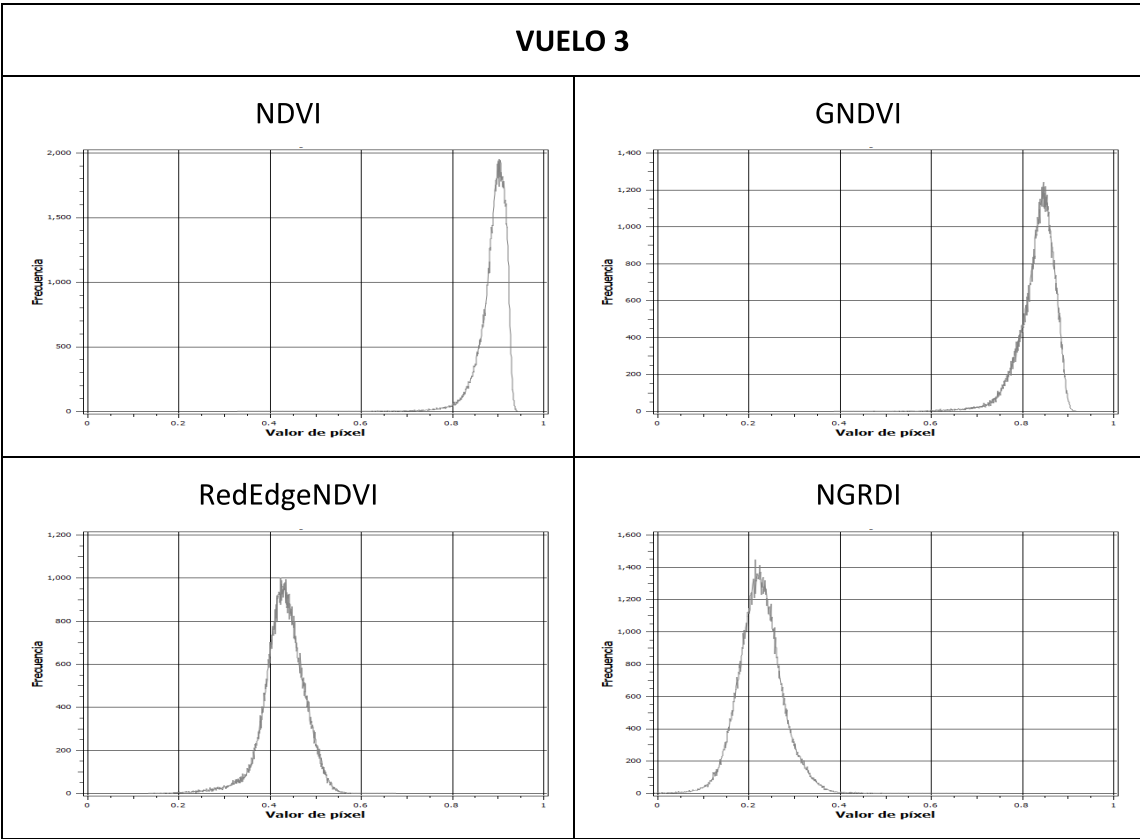


Figura 22: Histogramas de los índices de vegetación en el vuelo 3.

Observando la distribución de los histogramas, se puede ver que en el vuelo 1 los índices NDVI y GNDVI tienen un mayor rango de valores en comparación con los índices RedEdgeNDVI y NGRDI, por lo que representan mejor la variabilidad de la parcela en esta primera fecha.

Sin embargo, en los vuelos 2 y 3, donde la cubierta vegetal es mayor, el rango de datos de los índices NDVI, GNDVI se reduce drásticamente, llegando a ser inferior al rango de los índices RedEdgeNDVI y NGRDI, por lo que en este caso estos dos últimos índices ofrecen mayor información sobre la variabilidad del cultivo.

En cuanto a la distribución de los histogramas de los vuelos 2 y 3, se puede observar que en el caso de los índices NDVI y GNDVI los histogramas están totalmente ladeados hacia la derecha en el límite de los valores (del valor máximo 1), por lo que se puede ver gráficamente que estos índices se saturan con la cantidad de cubierta vegetal existente al realizar los vuelos 2 y 3.

En cuanto a la distribución de los datos de los índices RedEdgeNDVI y NGRDI en los vuelos 2 y 3, los histogramas tienen una distribución normal, por lo que el efecto de la saturación no es tan claro gráficamente.

#### 4.2- Comparación entre tratamientos de riego

Para buscar diferencias en el estado de la vegetación entre las dos zonas diferenciadas de la parcela donde se han aplicado diferentes recomendaciones de riego, se han calculado las estadísticas básicas de cada IV para cada una de las zonas además de los histogramas.

##### - Estadísticas de cada zona

##### VUELO 1

*Tabla 5: Estadísticas del vuelo 1 por zonas.*

	ZONA UPNA			ZONA INTIA		
IV	Media	Rango	Des. Est.	Media	Rango	Des. Est.
NDVI	0.242	0.758	0.120	0.270	0.780	0.112
GNDVI	0.308	0.579	0.084	0.317	0.587	0.082
RedEdgeNDVI	0.078	0.207	0.029	0.085	0.229	0.026
NGRDI	-0.069	0.576	0.046	-0.049	0.607	0.044

## VUELO 2

Tabla 6: Estadísticas del vuelo 2 por zonas.

	ZONA UPNA			ZONA INTIA		
IV	Media	Rango	Des. Est.	Media	Rango	Des. Est.
NDVI	0.919	0.336	0.019	0.917	0.552	0.029
GNDVI	0.859	0.373	0.027	0.855	0.618	0.036
RedEdgeNDVI	0.413	0.482	0.049	0.424	0.479	0.047
NGRDI	0.286	0.990	0.054	0.294	1.079	0.055

## VUELO 3

Tabla 7: Estadísticas del vuelo 3 por zonas.

	ZONA UPNA			ZONA INTIA		
IV	Media	Rango	Des. Est.	Media	Rango	Des. Est.
NDVI	0.899	0.611	0.023	0.882	0.349	0.036
GNDVI	0.840	0.530	0.034	0.826	0.351	0.044
RedEdgeNDVI	0.432	0.589	0.041	0.429	0.443	0.048
NGRDI	0.243	0.610	0.047	0.209	0.470	0.045

Comparando los valores medios obtenidos para cada IV en cada una de las zonas, no se observan diferencias significativas en ninguna de las fechas entre las zonas donde se han aplicado diferentes recomendaciones de riego. Por lo tanto, a primera vista parece que el desarrollo del cultivo ha sido muy similar independientemente de las recomendaciones de riego seguidas.

Las máximas diferencias se han observado en el primer vuelo, ya que en este caso los valores medios de los IV obtenidos en la zona INTIA son algo superiores a los obtenidos en la zona UPNA, pero como se ha mencionado estas diferencias no son significativas.

### - Distribución de los Índices de Vegetación en cada zona

Los histogramas de los diferentes IV obtenidos en las zonas de cultivo donde las recomendaciones de riego han sido diferentes son los siguientes:

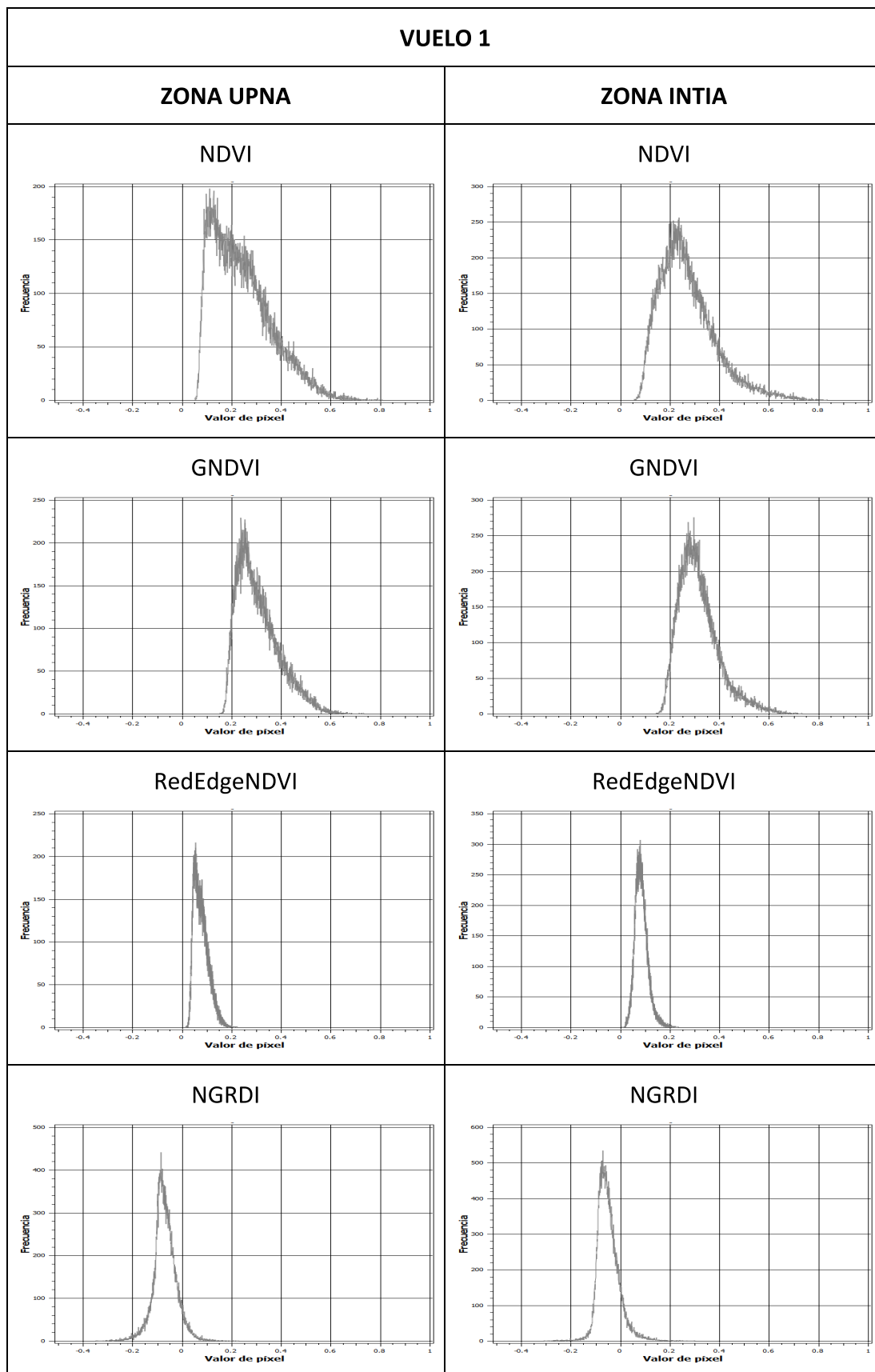


Figura 23: Histogramas del vuelo 1 por zonas.

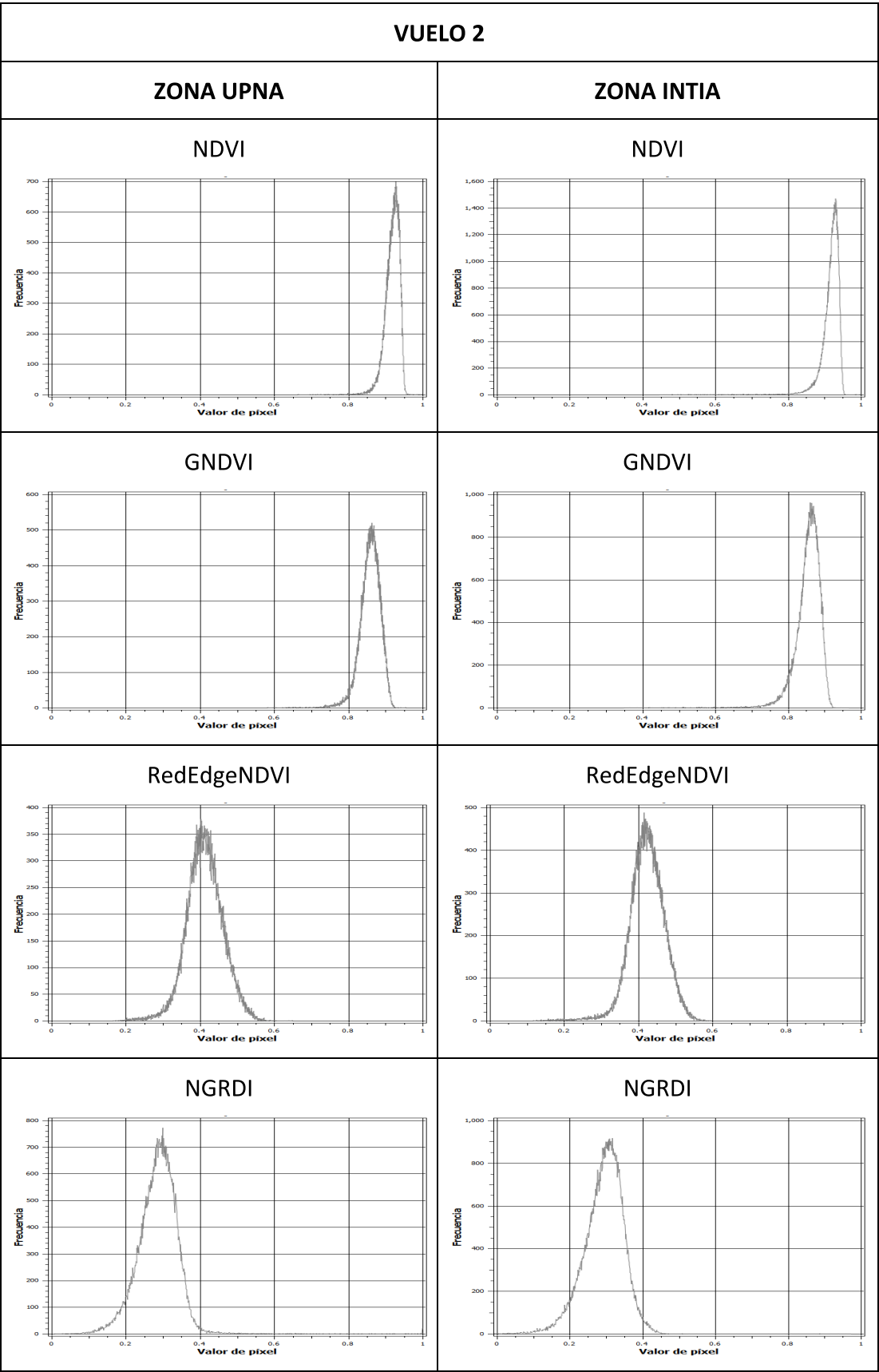


Figura 24: Histogramas del vuelo 2 por zonas.



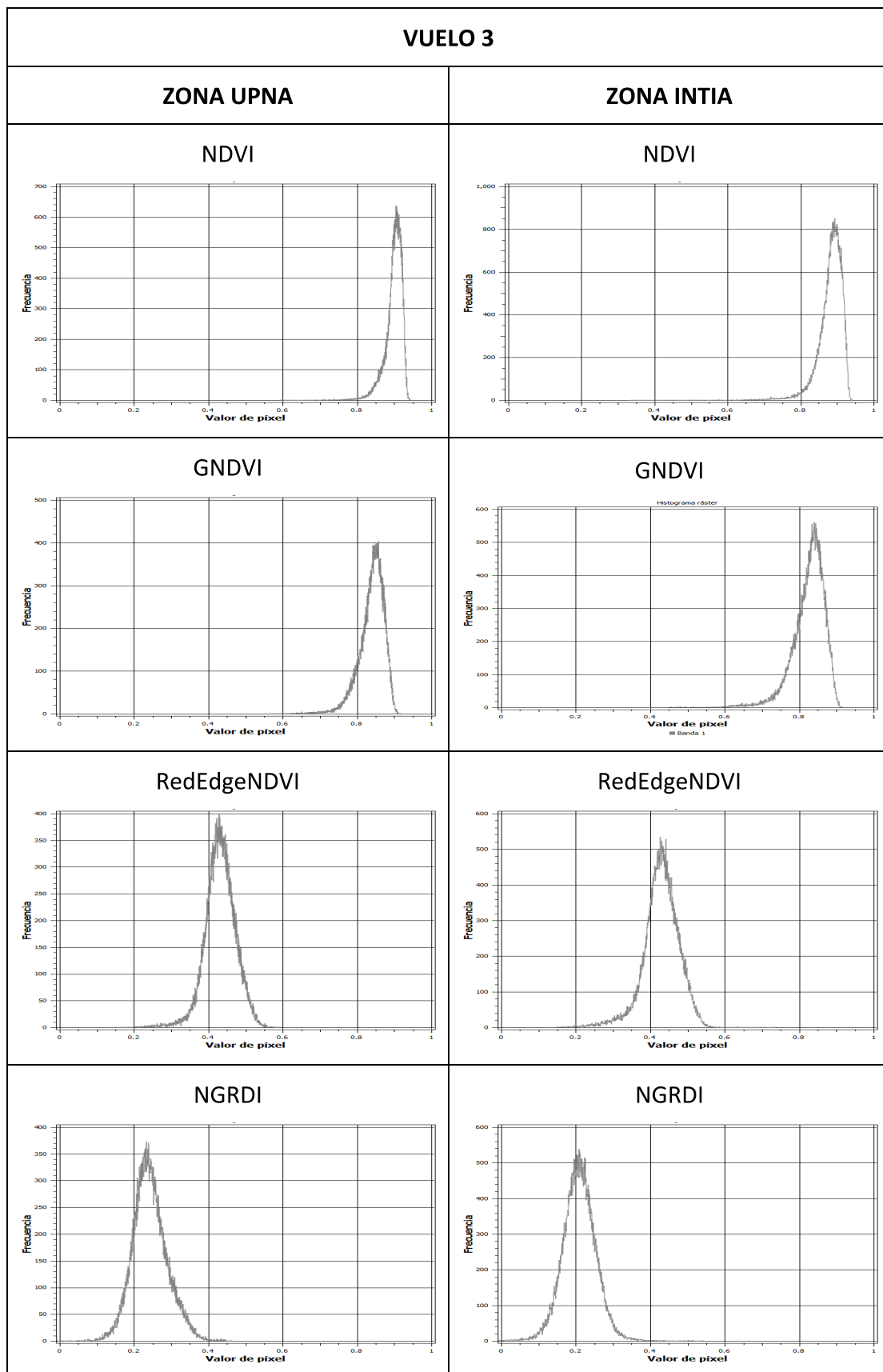


Figura 25: Histogramas del vuelo 3 por zonas.

Observando la distribución de los histogramas del vuelo 1 de ambas zonas se pueden apreciar diferencias en cuanto a la distribución de los datos en los índices NDVI, GNDVI y RedEdgeNDVI (sobre todo en el NDVI), ya que como se puede observar en la zona INTIA los histogramas tienen una distribución más normal que los de la zona UPNA. Esto se debe a que en la fecha en la que se realizó este vuelo (una etapa temprana del desarrollo del cultivo) una considerable área de la zona UPNA había tenido un desarrollo inicial más tardío, por lo que en esta zona deficiente se registraron valores más bajos de los IV, los cuales alteraron la distribución de los histogramas, ladeando los histogramas hacia la izquierda (hacia valores más bajos). Por lo tanto, se puede concluir que para esta fecha el cultivo se había desarrollado de forma más uniforme en la zona INTIA.

En el caso del índice NGRDI no se aprecian estas diferencias, ya que los histogramas tienen una distribución muy similar en ambas zonas.

En cuanto a los histogramas de los vuelos 2 y 3, cuando el desarrollo del cultivo era mayor, no se aprecian diferencias significativas en cuanto a la distribución de los datos en ninguno de los IV. Por lo tanto, según la interpretación de los histogramas, el grado de desarrollo del cultivo fue similar en ambas zonas, deduciendo que la zona deficiente del primer vuelo alcanzo un desarrollo final similar a la otra.

#### - Análisis de los datos de consumo de agua

Como se ha mencionado, en la parcela de estudio se aplicaron dos recomendaciones de riego distintas (zona UPNA y zona INTIA), por lo que el consumo de agua en cada una de ellas fue diferente. En este apartado se han tenido en cuenta los consumos de agua comenzando desde la siembra del maíz hasta cada una de las fechas en las que se han realizado los vuelos. Los consumos totales para cada una de las zonas se muestran en las siguientes tablas (Aguacanal, 2016):

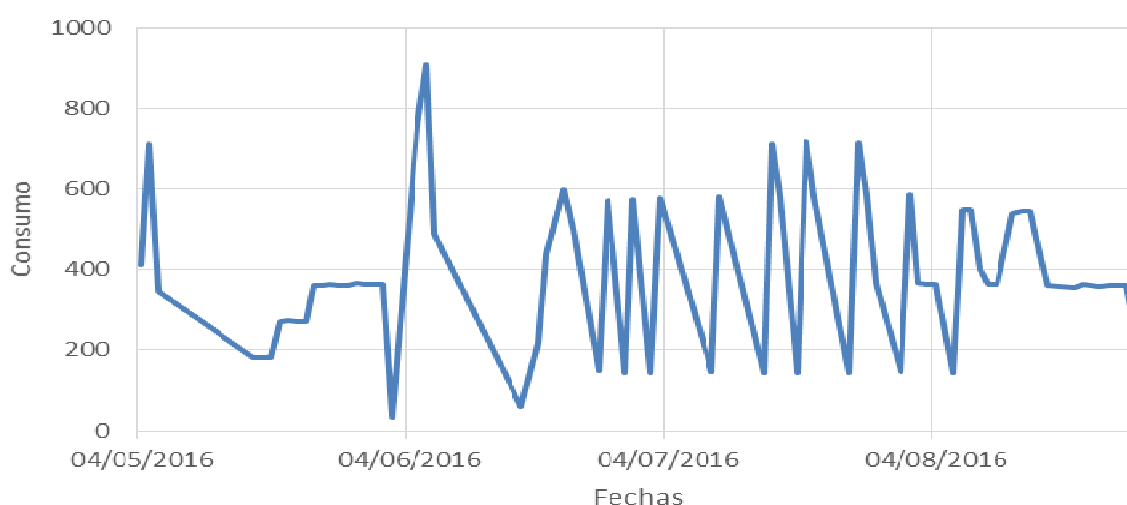
*Tabla 8: Consumo total de agua en la zona UPNA.*

Zona UPNA		
Fechas	Consumo (m <sup>3</sup> )	Consumo acumulado (m <sup>3</sup> )
01/05/2016 - 22/06/2016	9861	9861
22/06/2016 - 29/07/2016	8076	17937
29/07/2016 - 27/08/2016	9492	27429

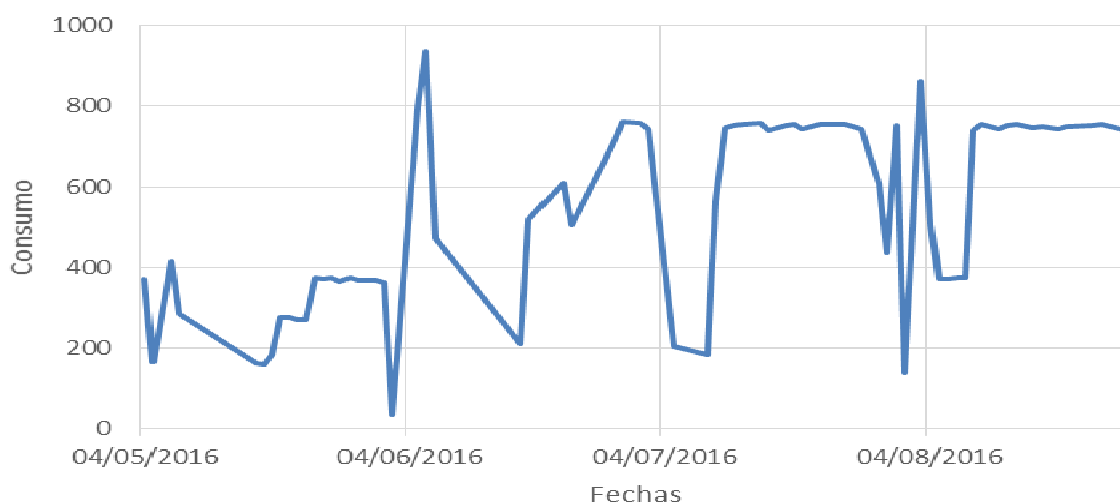
*Tabla 9: Consumo total de agua en la zona INTIA.*

Zona INTIA		
Fechas	Consumo (m <sup>3</sup> )	Consumo acumulado (m <sup>3</sup> )
01/05/2016 - 22/06/2016	9759	9759
22/06/2016 - 29/07/2016	14812	24571
29/07/2016 - 27/08/2016	13171	37742

Por otra parte también se han generado los gráficos de consumo para poder visualizar estos datos:



*Figura 26: Gráfico del consumo de agua en la zona UPNA.*



*Figura 27: Gráfico del consumo de agua en la zona INTIA*

Aunque las dos zonas tienen una superficie similar (la zona UPNA 4,86 Ha y la zona INTIA 5,29 Ha), se ha calculado el consumo por hectárea para poder equiparar los consumos entre ambas superficies. Los consumos por hectárea de ambas zonas se muestran en las siguientes tablas:

*Tabla 10: Consumo de agua por hectárea en la zona UPNA.*

Zona UPNA		
Fechas	Consumo (m <sup>3</sup> /Ha)	Consumo acumulado (m <sup>3</sup> /Ha)
01/05/2016 - 22/06/2016	2027	2027
22/06/2016 - 29/07/2016	1660	3686
29/07/2016 - 27/08/2016	1951	5637

*Tabla 11: Consumo de agua por hectárea en la zona INTIA.*

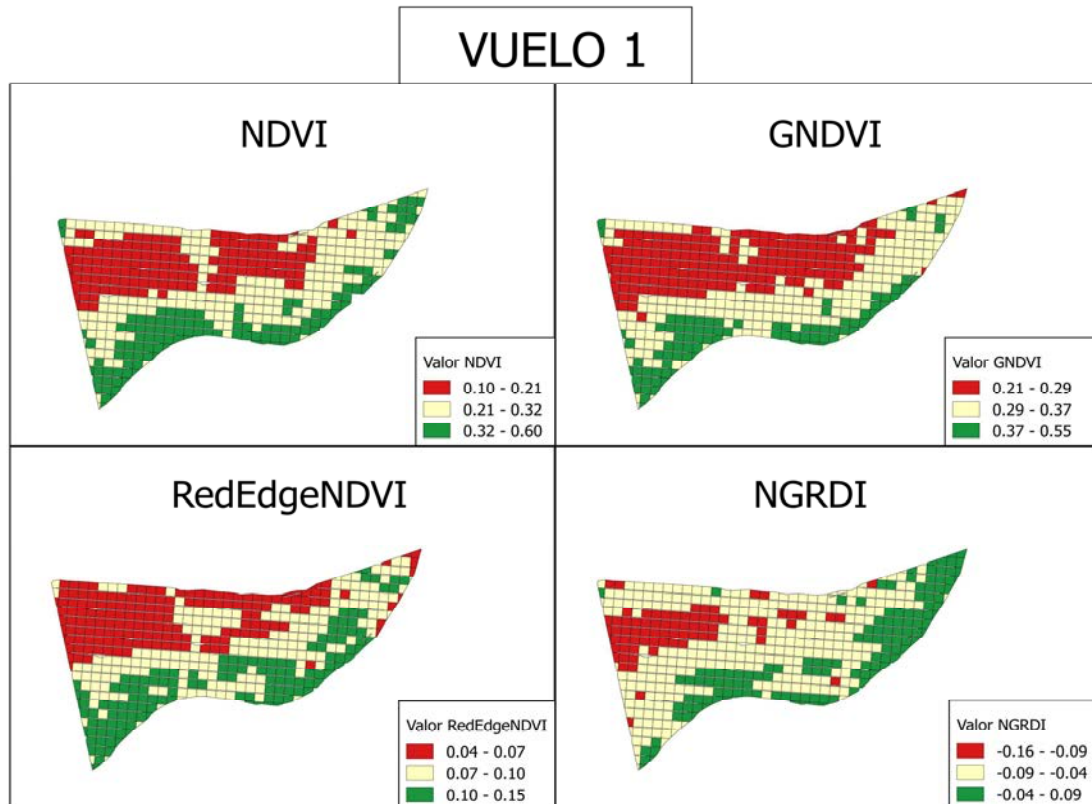
Zona INTIA		
Fechas	Consumo (m <sup>3</sup> /Ha)	Consumo acumulado (m <sup>3</sup> /Ha)
01/05/2016 - 22/06/2016	1843	1843
22/06/2016 - 29/07/2016	2797	4641
29/07/2016 - 27/08/2016	2488	7128

Como se puede observar en las tablas que muestran los consumos, el consumo de agua durante el periodo en el que se ha realizado este estudio fue claramente superior en la zona INTIA comparándolo con el consumo en la zona UPNA. En total (desde el 1 de Mayo hasta el 27 de Agosto) se gastaron 10.313 m<sup>3</sup> más de agua en la zona INTIA, 1491 m<sup>3</sup> más por hectárea.

Desde la fecha de siembra del maíz hasta la fecha del primer vuelo los consumos en ambas zonas fueron muy similares, siendo este consumo algo superior en la zona UPNA (2027 m<sup>3</sup>/Ha en la zona UPNA y 1843 m<sup>3</sup>/Ha en la zona INTIA). Sin embargo, a partir de esa fecha los consumos en la zona INTIA se incrementaron considerablemente mientras que en la zona UPNA se mantuvieron estables.

#### 4.3- Mapas de vigor por cuadrícula

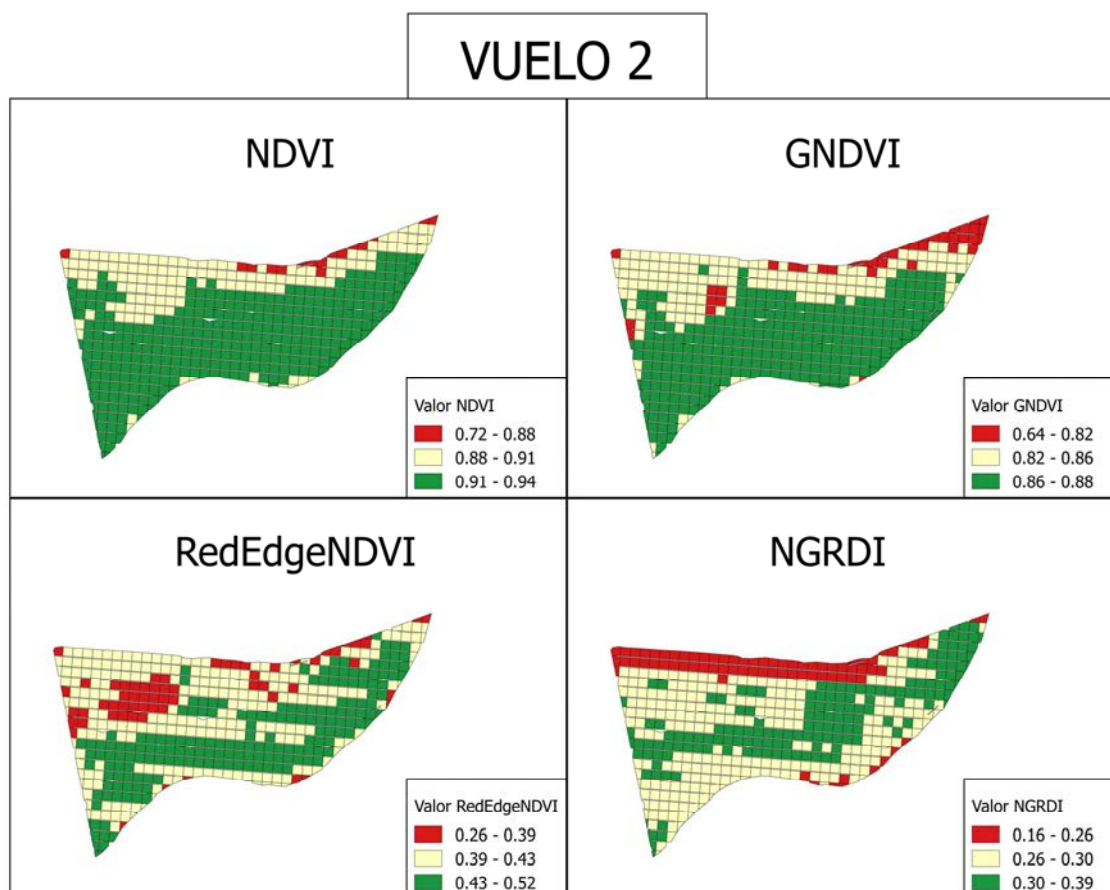
Tras clasificar en tres clases los polígonos obtenidos después de recortar la cuadrícula de 15 x 15 metros con la zona de cultivo, se obtuvieron los siguientes resultados para cada uno de los IV en cada uno de los vuelos. Es necesario recordar que al utilizar las rupturas naturales para establecer los rangos de las clases, no es posible comparar los diferentes mapas entre sí, ya que el objetivo de utilizar esta opción fue optimizar la visualización de la variabilidad del cultivo adaptándose a los datos en cada uno de los casos.



*Figura 28: Mapa de vigor por cuadrícula del vuelo 1.*

Observando los resultados obtenidos en el vuelo 1 a partir de los diferentes IV, se puede ver que mediante todos los índices se obtuvieron resultados similares sobre la variabilidad del cultivo, aunque como se ha mencionado estos resultados no son comparables, ya que para establecer los rangos de las diferentes clases se ha utilizado el método de rupturas naturales. Visualmente los resultados que más difieren del resto son los obtenidos mediante el índice NGRDI, ya que muestran menos zonas deficientes que en el resto.

En la fecha en la que se tomaron estos datos el cultivo estaba en una etapa temprana del desarrollo, por lo que había poca cubierta vegetal. Se puede observar que la zona norte de la parcela en general y la zona noroeste en particular presentaban menores valores de los diferentes IV, por lo que se interpreta que el cultivo tuvo un peor desarrollo inicial en estas zonas.



*Figura 29: Mapa de vigor por cuadrícula del vuelo 2.*

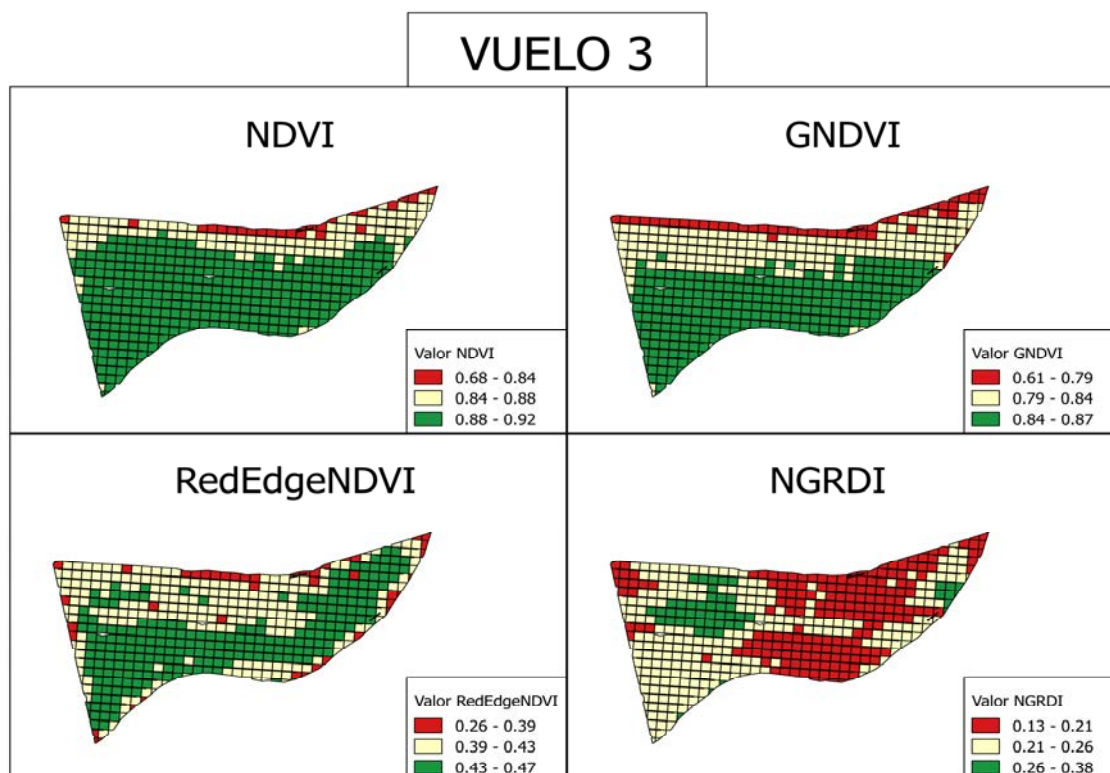
En los resultados del vuelo 2, se obtuvieron resultados similares con los índices NDVI, GNDVI y RedEdgeNDVI, aunque con algunas pequeñas diferencias. Por ejemplo, mientras que en el mapa obtenido a partir del GNDVI se indica como zona deficiente el noreste de la parcela, en el RedEdgeNDVI lo es la zona noroeste que coincide con la zona oscura de la fotografía aérea obtenida el 7 de Agosto de 2016 (Figura 30).



*Figura 30: Fotografía RGB de la parcela de estudio el 8 de agosto de 2016. El rectángulo rojo indica una zona de menor vigor.*

En cuanto al NGRDI, ofrece resultados diferentes, ya que en el mapa de vigor derivado a partir de este índice se destaca claramente como zona deficiente el borde norte de la parcela.





*Figura 31: Mapa de vigor por cuadrícula del vuelo 3.*

En los resultados obtenidos a partir del último vuelo realizado, el patrón fue similar al anterior, ya que los índices NDVI, GNDVI y RedEdgeNDVI ofrecieron resultados similares en cuanto a la variabilidad de la parcela, mientras que en este caso el NGRDI obtuvo resultados totalmente diferentes. En este caso el NDVI, GNDVI y RedEdgeNDVI mostraron una diferencia del estado del cultivo entre la zona norte y zona sur de la parcela. Esta diferenciación fue más clara en los mapas obtenidos a partir de los índices NDVI y GNDVI.

En el caso del mapa obtenido a partir del índice NGRDI, se puede observar una diferencia en el estado del cultivo entre la zona este y la zona oeste de la parcela, aunque en este caso se le ha dado más credibilidad a los resultados que se han obtenido mediante los índices NDVI, GNDVI y RedEdgeNDVI, ya que para su cálculo utilizan la reflectividad del NIR, una región a priori más interesante para obtener información sobre el estado de los cultivos.

#### 4.4- Selección del Índice de Vegetación óptimo

Tras analizar los resultados y los diferentes estudios utilizados como fuente de información para la realización de este trabajo, se descartaron algunos de los IV utilizados con el objetivo de seleccionar el IV óptimo entre los seleccionados inicialmente.

Se descartó el índice NGRDI, ya que es el único que no utiliza la banda NIR en su cálculo, siendo esta una banda que se ha utilizado en casi la totalidad de los trabajos consultados en la bibliografía (Kemerer et al., 2007; Sharma et al., 2015; Siratsuchi et al., 2011; Ramachandiran et al., 2015; Genc et al., 2013; Quemada et al., 2014; Shaver

et al., 2011; Mefford, 2014; Lelong et al., 2008; Shanahan et al., 2001), ya que esta banda ofrece información muy útil para determinar el estado de los cultivos.

También se descartaron los índices NDVI y GNDVI, debido a que aunque los resultados mostraron cierto grado de saturación para todos los IV a valores altos de IAF, los histogramas generados (Figuras 23-25) mostraron que el índice RedEdgeNDVI representa mejor la variabilidad de la parcela en comparación con el NDVI y GNDVI, además de que parece tener un mayor umbral de saturación.

Por lo tanto el índice seleccionado como más óptimo entre los cuatro seleccionados inicialmente fue el RedEdgeNDVI.

#### 4.5- Zonificación según el vigor

Realizando una interpolación TIN a partir de los centroides de la cuadrícula 15 x 15 m, se obtuvieron los siguientes mapas de vigor para cada uno de los vuelos. Como se ha mencionado, este proceso solo se realizó con los valores del IV RedEdgeNDVI, con el objetivo de conseguir un mapa continuo sobre la vigorosidad del cultivo.

Como se ha mencionado en el apartado de 3, diferenciaron las zonas de vigor alto y de vigor bajo a partir del valor medio del IV RedEdgeNDVI de toda la parcela calculado para cada uno de los vuelos.

##### VUELO 1

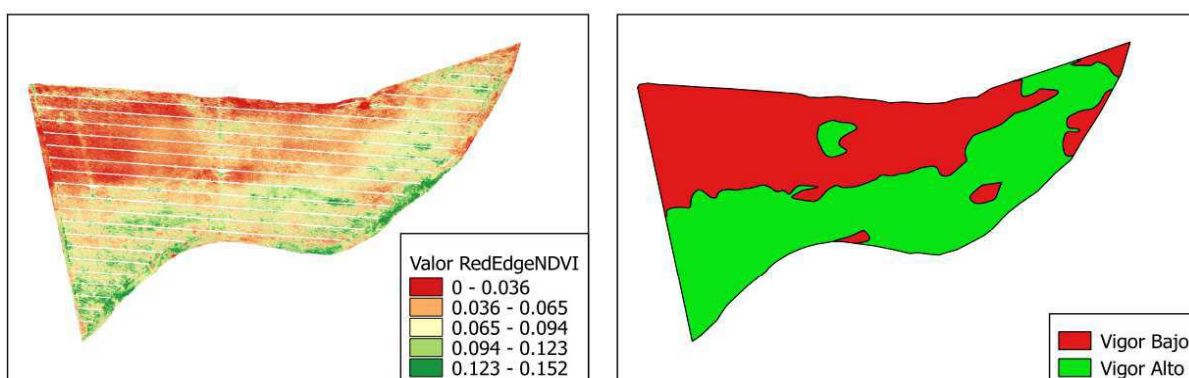


Figura 32: Mapa de vigor con los datos de cada píxel (izquierda) y mapa de vigor tras realizar la interpolación TIN (derecha) del vuelo 1.

##### VUELO 2

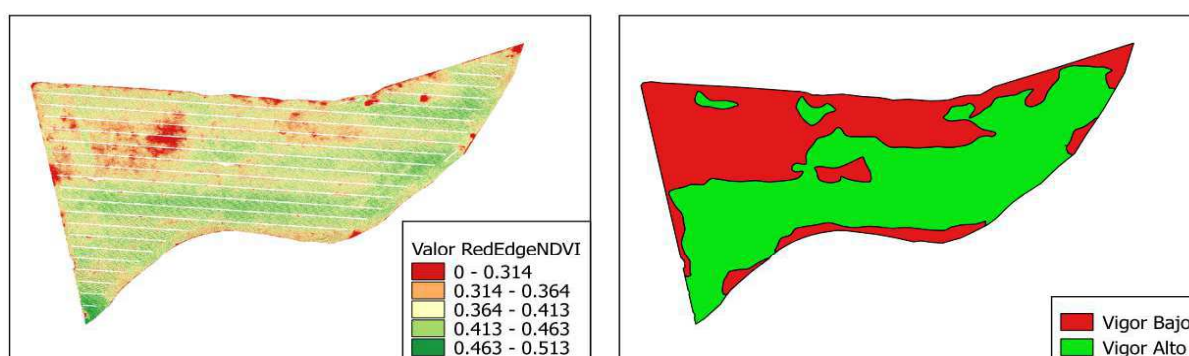


Figura 33: Mapa de vigor con los datos de cada píxel (izquierda) y mapa de vigor tras realizar la interpolación TIN (derecha) del vuelo 2.

### VUELO 3

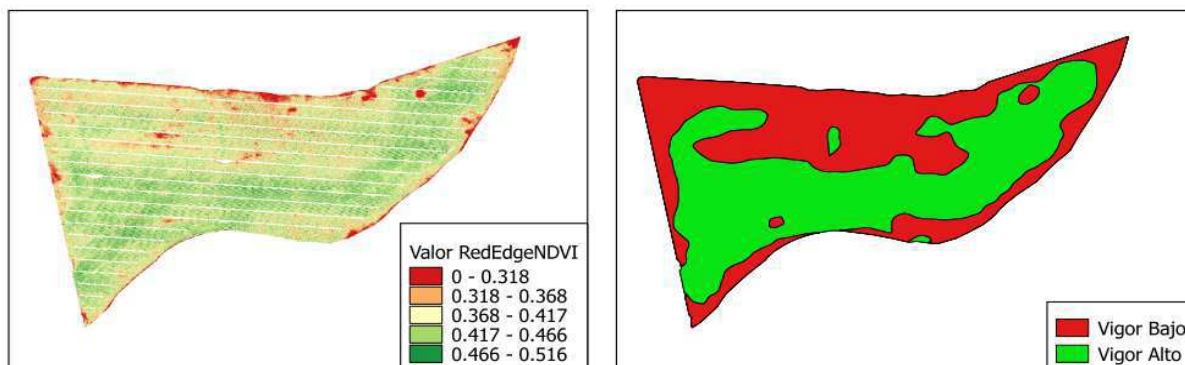


Figura 34: Mapa de vigor con los datos de cada píxel (izquierda) y mapa de vigor tras realizar la interpolación TIN (derecha) del vuelo 3.

#### - Diferencias entre zonas de vigor alto y vigor bajo

Tras extraer para cada una de las zonas (zona de vigor alto y zona de vigor bajo) los valores medios de los ortomosaicos de reflectividad de cada una de las bandas (verde, rojo, RedEdge y NIR), se han generado los siguientes gráficos donde se muestra el comportamiento espectral del cultivo en cada una de las zonas para cada uno de los vuelos.

### VUELO 1

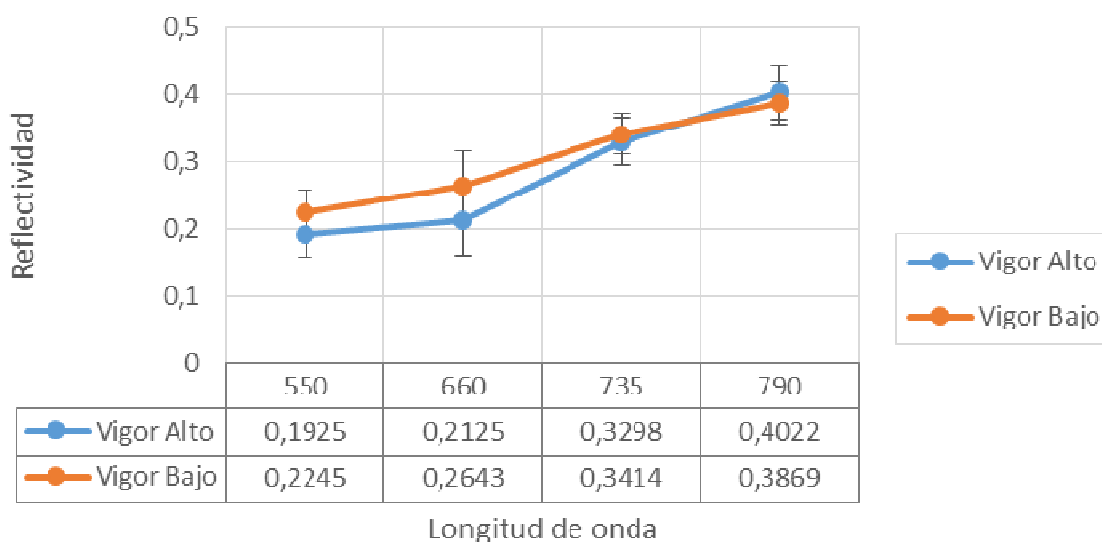


Figura 35: Gráfico y tabla de los valores de reflectividad obtenidos en las zonas de vigor bajo y vigor alto en el vuelo 1.

VUELO 2

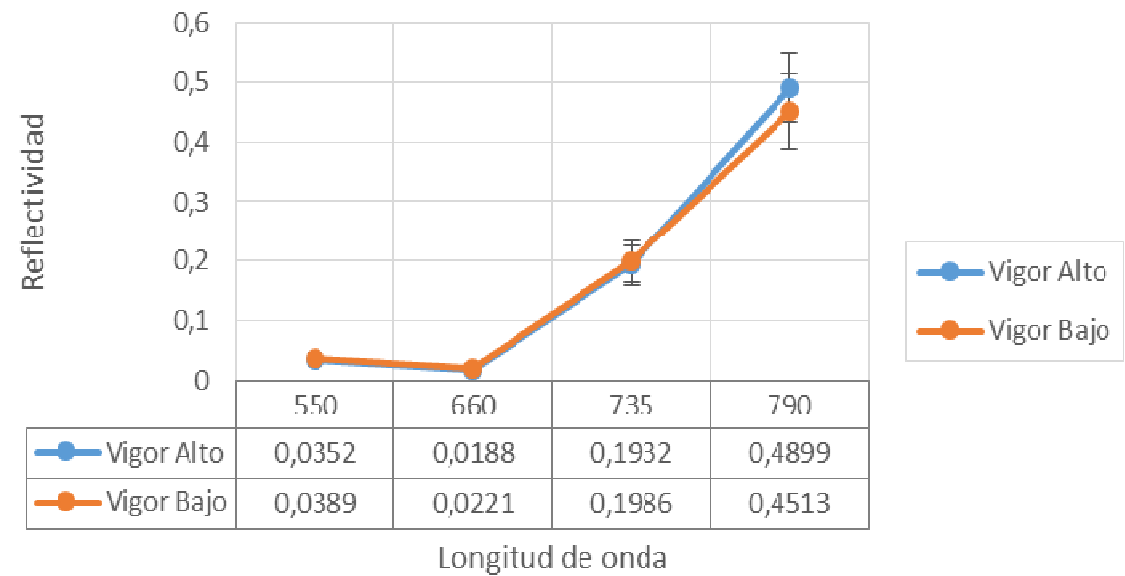


Figura 36: Gráfico y tabla de los valores de reflectividad obtenidos en las zonas de vigor bajo y vigor alto en el vuelo 2.

VUELO 3

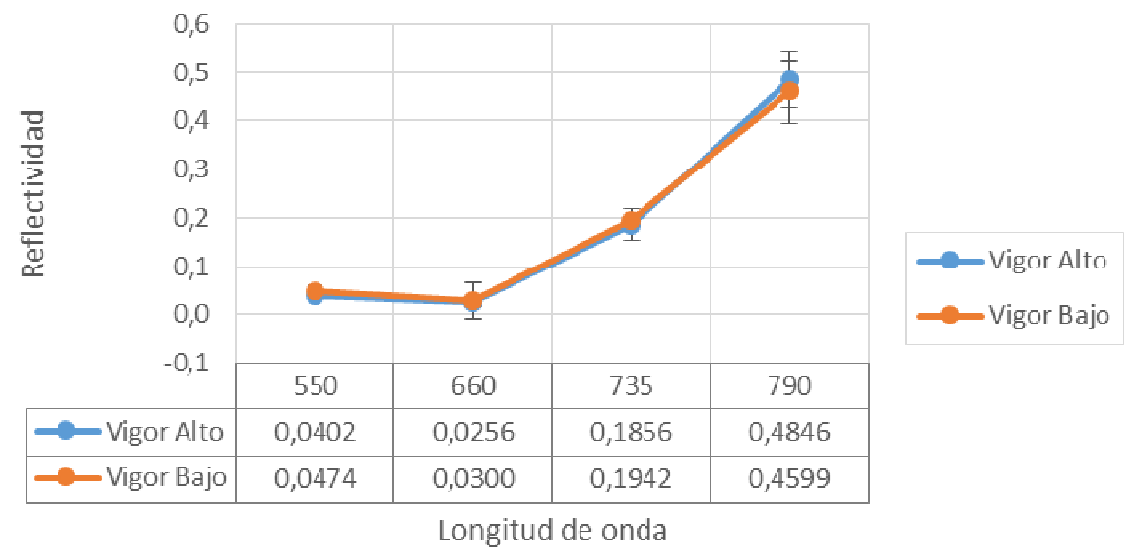


Figura 37: Gráfico y tabla de los valores de reflectividad obtenidos en las zonas de vigor bajo y vigor alto en el vuelo 3.

Como se puede observar en el gráfico del vuelo 1, se obtuvieron valores de reflectividad medios más altos en la banda roja que en la verde. Esto se debe a que la superficie de cubierta vegetal era menor que la superficie de suelo desnudo, por lo que predominaba la reflectividad del suelo, que tiene mayor reflectividad en el rojo que en el verde.

Sin embargo, en los valores de reflectividad medios de los vuelos 2 y 3 ocurre lo contrario, ya que se obtuvieron valores más altos en la banda verde que en la roja.

Esto se debe a que la superficie de cubierta vegetal fue mayor que la superficie de suelo desnudo, y por lo tanto predominaba la reflectividad de la vegetación.

Por último, en todos los vuelos realizados los valores de reflectividad en el visible (verde y rojo) fueron más bajos en las zonas consideradas de vigor alto en comparación con las zonas de vigor bajo. Sin embargo, con los valores de reflectividad registrados en el NIR ocurrió lo contrario, ya que estos valores son mayores en las zonas consideradas de alto vigor. Esto coincide con lo mencionado en el estado del arte sobre los trabajos analizados, ya que es el comportamiento que presenta la vegetación cuando está afectada por algún tipo de estrés.

## **5- Conclusiones**

Es necesario mencionar que las conclusiones que aquí se plantean son preliminares, debido a que este trabajo tuvo que finalizar antes del periodo de recolección del maíz (en octubre). En consecuencia, no se ha podido hacer un seguimiento durante un ciclo completo de cultivo ni tampoco se han podido comparar los resultados obtenidos con los datos de rendimiento del cultivo que se obtienen tras la recolección. Sin embargo, se han podido obtener diversas conclusiones que de por sí resultan interesantes.

En primer lugar, en lo que respecta al análisis de los distintos IV, se observó que todos ellos estaban altamente correlacionados, si bien fue el NGRDI el que obtuvo unos resultados más diferentes del resto. Esto fue así sobre todo en el tercer vuelo cuando la cubierta vegetal fue mayor. La causa de esto puede ser que el NGRDI no utiliza la región NIR del espectro electromagnético, una región muy interesante para conocer el estado de los cultivos.

También se comprobó que todos los IV se saturaban cuando los valores de IAF eran altos, aunque en estos casos el RedEdgeNDVI y NGRDI fueron los que mostraron un mayor umbral de saturación y ofrecieron más información sobre la variabilidad del cultivo. El índice RedEdgeNDVI fue el que se estimó más útil para el seguimiento del maíz.

En cuanto a la variabilidad del cultivo, hay que mencionar que en general ha sido una parcela con un desarrollo del cultivo homogéneo y con poca variabilidad. En todo caso se observaron leves diferencias debido a la situación geográfica, ya que en la zona norte de la parcela el cultivo presentaba un peor estado que en la zona sur, aunque las diferencias eran leves.

Entre los dos tratamientos de riego comparados, las diferencias en el estado del cultivo fueron también menores. En el vuelo 1 se observaron unas pequeñas diferencias entre la zona gestionada por la cooperativa de Artajona (zona INTIA) y la zona gestionada por la UPNA (zona UPNA). En esta última zona, se observó una zona de la parcela que tuvo un desarrollo inicial más tardío, pero en fechas más avanzadas se equiparó el desarrollo de ambas zonas. Por lo tanto, en los resultados obtenidos en los vuelos 2 y 3 apenas existían diferencias entre ambas parcelas. Esto contrasta con los consumos de agua destinados a cada uno de los tratamientos, ya que en la zona INTIA el consumo fue muy superior en estas fechas posteriores.

Viendo que los resultados sobre el estado del cultivo fueron similares en ambas zonas, resulta interesante considerar la alternativa de una gestión del riego basada en

medidas de humedad de suelo en campo en lugar del seguimiento de recomendaciones genéricas realizadas de forma convencional. Por lo tanto, sería conveniente plantear la implantación de un sistema de este tipo con el objetivo de lograr un ahorro en el consumo de agua.

Para finalizar, cabe destacar la utilidad de las imágenes multiespectrales obtenidas desde plataformas UAV para realizar el seguimiento de cultivos, ya que ofrecen una visión global sobre el estado del cultivo con una gran precisión, además de que la metodología en cuanto a la captura de datos se refiere es más sencilla y económica en comparación con otros métodos.



## 6- Bibliografía

- AESA, Marco Regulatorio de Drones, <http://www.seguridadaerea.gob.es/>, última consulta 20 de mayo de 2016.
- Aguacanal, Visualización consumo diario en Hidrante, disponible en <http://www.aguacanal.es/>, última consulta 3 de septiembre de 2016.
- ArcGIS, Manual de ayuda de ArcGIS, disponible en <https://pro.arcgis.com/es/>, última consulta 3 de septiembre de 2016.
- AUVSI (2013), The economic impact of Unmanned Aircraft Systems integration in the USA, disponible en:  
[http://higherlogicdownload.s3.amazonaws.com/AUVSI/958c920a-7f9b-4ad2-9807-f9a4e95d1ef1/UploadedImages/New\\_Economic%20Report%202013%20Full.pdf](http://higherlogicdownload.s3.amazonaws.com/AUVSI/958c920a-7f9b-4ad2-9807-f9a4e95d1ef1/UploadedImages/New_Economic%20Report%202013%20Full.pdf)
- Baluja, J., Diago, M. P., Balda, P., Zorer, R., Meggio, F., Morales, F., Tardaguila, J. (2012). "Assessment of vineyard water status variability by thermal and multispectral imagery using an unmanned aerial vehicle (UAV)". *Irrigation Science*, 30, 511-522.
- Berni, J. A., Zarco-Tejada, P., Suárez, L., Fereres, E. (2009). "Thermal and Narrowband Multispectral Remote Sensing for Vegetation Monitoring From an Unmanned Aerial Vehicle". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49, 722-738.
- Cuerno, C. (2015) Capítulo 1. Origen y desarrollo de los sistemas de aeronaves pilotadas por control remoto. En "Los Drones y sus aplicaciones a la ingeniería civil". DG de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid, 15-32.
- Díaz, J. J. (2015), "Estudio de Índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión". Trabajo Fin de Master. Universidad Complutense de Madrid.
- Dji, Phantom 4 Especificaciones, disponible en <http://www.dji.com/es>, última consulta 5 de junio de 2016.
- FAO, Estadísticas de la FAO, disponible en [www.fao.org](http://www.fao.org), última consulta 20 de mayo de 2016.
- Farrell, M., Ghironi, E. M., Corró Molas, A. E., Mieza, S. (2013). "Relación de índices espectrales con parámetros vegetales en el cultivo del maíz". *Proceedings XIV Simposio Internacional SELPER*.
- Fassio, A., Carriquiry, A. i., Tojo, C., Romero, R. (1998). "Maíz: Aspectos sobre fonología". Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria de Uruguay.
- Gago, J., Douthe, C., Coopman, R.E., Gallego, P.P., Ribas-Carbo, M., Flexas, J., Escalona, J., Medrano, H. (2015). "UAVs challenge to assess water stress for sustainable agriculture". *Agricultural Water Management*, 153, 9-19
- Genc, L., Inapulat, M., Kizil, U., Mirik, M., Smith, S. E., Mendes, M. (2013). "Determination of water stress with spectral reflectance on sweet corn (*Zea mays* L.) using classification tree (CT) análisis". *Zemdirbyste-Agriculture*, 100, 81-90.
- Gilabert, M. A., González-Piqueras, J., García-Haro, J. (1997). "Acerca de los Índices de Vegetación". *Revista de Teledetección*, 8, 1-10.

- Gonzalez-Dugo, V., Zarco-Tejada, P., Nicolás, E., Nortes, P. A., Alarcón, J. J., Intrigliolo, D. S., Fereres, E. (2013). "Using high resolution UAV thermal imagery to assess the variability in the water status of five fruit tree species within a commercial orchard". Precision Agric.
- Hernández, J. y Montaner, D.. "Patrones de respuesta espectral". Facultad Ciencias Forestales Universidad de Chile. Disponible en : <http://www.gep.uchile.cl/Publicaciones/Hern%C3%A1ndez%20&%20Montaner%2009%20SAF.pdf>
- Isla, R. y López-Lozano, R. (2005). "Comparación de distintos índices de vegetación para detectar deficiencias de nitrógeno en maíz". Revista de Teledetección, 24, 5-9.
- Jones, H.G., Serraj, R., Loveys, B.R., Xiong, L., Wheaton, A., Price, A.H.(2009). "Thermal infrared imaging of crop canopies for the remote diagnosis and quantification of plant responses to water stress in the field". Functional Plant Biology, 36, 978-989.
- Kemerer, A., Di Bella, C., Melchiori, R., Benech, A., Alvarez, R. (2007). "Comparación de índices espectrales para la predicción del IAF en canopeos de maíz". Actas del XII Congreso de la Asociación Española de Teledetección, 2007, 125-129.
- Leinonen, I., Jones, H.G.(2004). "Combining thermal and visible imagery for estimating canopy temperature and identifying plant stress". Journal of Experimental Botany, 55(401), 1423-1431.
- Lelong, C., Burger, P., Jubelin, G., Roux, B., Labbé, S., Baret, F. (2008). "Assessment of Unmanned Aerial Vehicles Imagery for Quantitative Monitoring of Wheat Crop in Small Plots". Sensors, 8, 3557-3585.
- Li, L., Nielsen, D. C., Yu, Q., Ma, L., Ahuja, L. R. (2008). "Evaluating the Crop Water Stress Index and its correlation with latent heat and CO<sub>2</sub> fluxes over winter wheat and maize in the North China plain ". Agricultural Water Management, 2690.
- López, C. (2015) Prólogo. En "Los Drones y sus aplicaciones a la ingeniería civil". DG de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid, 13-14.
- López-Granados, F. (2010). "Weed detection for site-specific weed management: mapping and real-time approaches". Weed Research, 51, 1-11.
- MAGRAMA, Superficies y producciones anuales de cultivo de acuerdo con el Reglamento (CE) 543 / 2009, disponible en [www.magrama.org.es](http://www.magrama.org.es), última consulta 20 de mayo de 2016.
- Manivasagam, V.S., Nagarajan, R.. "Water stress assessment in maize crop using field hyperspectral data". Proceedings of the Asian association on Remote Sensing. Disponible en: [http://a-a-r-s.org/acrs/administrator/components/com\\_jresearch/files/publications/TU2-4-2.pdf](http://a-a-r-s.org/acrs/administrator/components/com_jresearch/files/publications/TU2-4-2.pdf)
- Maturano, M. (2002). "Estudio del uso del agua y del nitrógeno dentro del marco de una agricultura sostenible en las regiones maiceras castellano-manchega y argentina". Tesis doctoral. Universidad de Castilla la Mancha.

- Mefford, B. (2014). "Assessing corn water stress using spectral reflectance". Tesis doctoral. Department of Civil and Environmental Engineering. Universidad Estatal de Colorado.
- Moller, M., Alchanatis, V., Cohen, Y., Meron, M., Tsipris, J., Naor, A., Ostrovsky, V., Sprintsin, M., Choen, S. (2006). "Use of thermal and visible imagery for estimating crop water status of irrigated grapevine". *Journal of Experimental Botany*, 58, 827-838.
- Montesinos, S. (2015a). "Aplicaciones operativas de los drones en Agriculturas de precisión. Lecciones aprendidas". *Teledetección: Humedales y Espacios Protegidos. XVI Congreso de la Asociación Española de Teledetección*, 629-632.
- Montesinos, S. (2015b). Capítulo 8. Aplicaciones a la agricultura. En "Los Drones y sus aplicaciones a la ingeniería civil". DG de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid, 101-117.
- Nex, F., Remondino, F. (2014). "UAV for 3D mapping applications: a review". *Appl Geomat*, 6, 1-15.
- Ngie, A., Ahmed, F., Abutaleb, K. (2014). "Remote sensing potential for investigation of maize production: review of literature". *South African Journal of Geomatics*, 3, 163-184.
- Oñate de Mora, M. (2015). Capítulo 3. Tipología de aeronaves pilotadas por control remoto. En "Los Drones y sus aplicaciones a la ingeniería civil". DG de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid, 49-56.
- Ormeño, S. (2006). Tema 5. Características espectrales de la vegetación. En "Teledetección Fundamental". Universidad Politécnica de Madrid.
- Parrot, Parrot Sequoia, disponible en <http://www.parrot.com/es/>, última consulta 5 de junio de 2016.
- Peña, J. M., Torres-Sánchez, J., de Castro, A. I., Kelly, M., López-Granados, F. (2013). "Weed Mapping in Early-Season Maize Fields Using Object-Based Analysis of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Images". *PLOS One*, 8 (10), 1-11.
- Pérez, J. A. (2001). Tema 1. Planificación de un proyecto fotogramétrico. En "Apuntes de fotogrametría III". Universidad de Extremadura.
- Pix4D, Manual, disponible en [www.pix4d.com](http://www.pix4d.com), última consulta 1 de junio de 2016.
- Portero, C., Mercadal, M., Salas, P. (2015). "Incorporación de imágenes aéreas en el manejo del cultivo del maíz". *Análisis espacial y representación geográfica: innovación y aplicación*, 807-815.
- Quemada, M., Gabriel, J. L., Zarco-Tejada, P. (2014). "Airborne Hyperspectral Images and Ground-Level Optical Sensors As Assessment Tools for Maize Nitrogen Fertilization". *Remote Sensing*, 6, 2940-2962.
- Ramachandiran, K., Pazhanivelan, S. (2015). "Tree algorithm to predict the nitrógeno and water stress of maize using spectral vegetation indices". *Life Sciences Leaflets*, 64, 82-93.

- Ramos, C. A. (2015). "Método para estimar el contenido de Nitrógeno en cultivos de maíz (*Zea mays* L.) con base en espectrometría". Tesis doctoral. Universidad Nacional de Colombia.
- Raymond, E., Dean, W., Fujikawa, S., Linden, D., Daughtry, C. McCarty, G. (2010). "Acquisition of NIR-Green-Blue Digital Photographs from Unmanned Aircraft for Crop Monitoring". *Remote Sensing*, 2, 290-305.
- Schepers, J. S., Blackmer, T. M., Wilhem, W. W., Resende, M. (1996). "Transmittance and Reflectance Measurements of Corn Leaves from Plants with Different Nitrogen and water Supply". *Journal of Plant Physiology*, 148, 523-529.
- Shanahan, J.F., Schepers, J. S., Francis, D. D., Varvel, G. E., Wilhelm, W., Tringe, J.M., Schlemmer, M. R., Major, D. J. (2001). "Use of Remote-Sensing Imagery to Estimate Corn Grain Yield". *Agronomy & Horticulture*, 93, 583-589.
- Sharma, L. K., Bu, H., Denton, A., Franzen, D. W. (2015). "Active-Optical Sensors Using Red NDVI Compared to Red Edge NDVI for Prediction of Corn Grain Yield in North Dakota, U.S.A.". *Sensors*, 15, 27832-27853.
- Shaver, T. M., Khosla, R., Westfall, D. G. (2011). "Evaluation of two crop canopy sensors for nitrogen variability determination in irrigated maize". *Precision Agric.*
- Shi, Y., Thomasson, J. A., Murray, S., Pugh, N., Rooney, W., Shafian, S., Rajan, N., Rouze, G., Morgan, C., Neely, H., Rana, A., Bagavathiannan, M., Henrickson, J., Bowden, E., Valasek, J., Olsenholler, J., Bishpo, M., Sherindan, R., Putman, E., Popescu, S., Burks, T., Cpoe, D., Ibrahim, A., McCutchen, B., Baltensperger, D., Avant, R., Vidrine, M., Yang, C. (2016). "Unmanned Aerial Vehicles for High-Throughput Phenotyping and Agronomic Research". *PLOS One*, 11 (7).
- Shiratsuchi, L., Ferguson, R., Shanahan, J., Adamchuk, V., Rundquist, D., Marx, D., and Slater, G. (2011). "Water and Nitrogen Effects on Active Canopy Sensor Vegetation Indices". *Agronomy Journal*, 103, 1815-1826.
- Taghvaeian, S., Chávez, J. L., Hansen, N. (2012). "Infrared Thermometry to Estimate Crop Water Stress Index and Water Use of Irrigated Maize in Northeastern Colorado". *Remote Sensing*, 4, 3619-3637.
- Technidrone, Productos, disponible en <http://www.technidrone.es/> , última consulta 25 de agosto de 2016.